

**UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL  
INSTITUT DE MICROTECHNIQUE**

# **Regelung einer Stückholzfeuerung**

## **Abhandlung**

**zur Erlangung des Titels eines  
Doktors der Naturwissenschaften**

**der  
Universität Neuchâtel**

**vorgelegt von  
Dieter Kerschbaumer  
Dipl. Phys. ETH**

# IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Réglage automatique d'une chaudière à bûches

de Monsieur Dieter Kerschbaumer

---

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel  
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs A. Shah, F. Pellandini, P. Suter

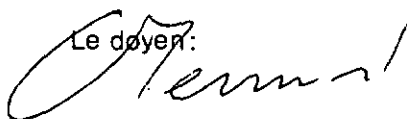
(EPF-Zurich), P. Schweizer (Bubendorf, BL)

et R. Marutzky (Braunschweig)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 20 décembre 1990

Le doyen:



Cl. Mermod

# I Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit wurde am 'Institut de Microtechnique' der Universität Neuchâtel geschrieben. Alle Versuche und Messungen wurden im Versuchsraum der Firma Tiba AG in Bubendorf / BL durchgeführt. Dort wurden auch alle Prototypen der Feuerungen gebaut. Die Finanzierung unseres Forschungsprojektes übernahmen je zur Hälfte die Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung des Bundesamtes für Konjunkturfragen in Bern (Projekte Nr. 1297 und 1631) und die Firma Tiba AG.

Allen Personen, die in irgend einer Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich hiermit herzlich danken.

Insbesondere danke ich Herrn Professor Shah für das Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat, für seine Unterstützung und dafür, dass er mir diese Arbeit überhaupt ermöglichte.

Ebenso danke ich Herrn Paul Schweizer für alle Diskussionen, die viel zum Gelingen der Arbeit beitrugen und für seine engagierte Unterstützung des Projektes bei der Firma Tiba AG.

Allen Mitarbeitern der Firma Tiba und des 'Institut de Microtechnique', die mir bei der Lösung vieler Probleme geholfen haben, möchte ich hier ebenfalls meinen Dank aussprechen.

Dr. Thomas Nussbaumer danke ich für die vielen anregenden Diskussionen über Holzverbrennung und Emissionen.

Dr. N. J. Rao danke ich für seine Einführung in die Prozessregeltechnik und für seine Hilfe bei der Simulation der Regelung.

Den Experten Dr. Mörutzky, Dr. Suter und Dr. Pellandini danke ich für alle Anregungen und Verbesserungsvorschläge für die Arbeit.

Ebenso danke ich meinen Eltern, die diese Arbeit überhaupt ermöglicht haben.

Neuchâtel, Dezember 1990

Dieter Kerschbaumer

## II Inhaltsverzeichnis

---

I	Vorwort .....	5
II	Inhaltsverzeichnis.....	7
III	Zusammenfassung.....	11
IV	Abstract.....	13
V	Résumé.....	14
1	Motivation und Zielsetzung.....	15
1.1	Stand heutiger Holzfeuerungen .....	15
1.2	Rahmenbedingungen und Zielsetzung.....	16
2	Grundlagen.....	17
2.1	Holz als Brennstoff.....	17
2.2	Holzzusammensetzung.....	18
2.3	Verbrennung.....	20
2.4	Konstruktion einer Stückholzfeuerung.....	23
3	Verbrennungsrechnung.....	25
3.1	Verbrennungsgleichung und Luftüberschuss.....	25
3.2	Messung des Luftüberschusses: .....	26
3.2.1	Vereinfachte Formeln.....	28
3.3	Adiabate Verbrennungstemperatur.....	28
3.3.1	Messung der Verbrennungstemperatur.....	30
3.4	Luftbedarf, Abgas- und Wasserdampfmenge.....	31
3.5	Erzeugte Leistung.....	32
3.6	Abgasverluste.....	33
3.7	Unvollständige Verbrennung, Schadstoffe.....	34
3.8	Normierung der Emissionsmesswerte.....	34
3.9	Mittelwertbildung der Emissionsmesswerte .....	35

## II Inhaltsverzeichnis

<b>4</b>	<b>Versuchsführung und Messanlage</b> .....	<b>37</b>
4.1	Beschreibung der Führung.....	37
4.1.1	Überlegungen zur Konstruktion.....	38
4.2	Wasserkreislauf.....	39
4.3	Messgeräte.....	41
4.3.1	Stoffbilanz.....	41
4.3.2	Energiebilanz.....	42
4.3.3	Zusätzliche Messungen.....	42
4.3.4	Beschreibung der einzelnen Messgeräte.....	42
4.4	Abgasaufbereitung.....	47
4.5	Datenaquisition.....	48
4.6	Messprogramm.....	50
4.7	Messung der Holzfeuchtigkeit.....	51
<b>5</b>	<b>Testmessungen</b> .....	<b>53</b>
5.1	Zweck unseres Referenzversuchs.....	53
5.1.1	Allgemeine Versuchsbedingungen.....	53
5.2	Mittelwerte über die Verbrennung einer ganzen Charge.....	54
5.3	Überprüfung der Stoffbilanz.....	55
5.3.1	Luftüberschuss.....	56
5.3.2	Gaskonzentrationen.....	57
5.3.3	Abgasvolumenstrom.....	58
5.4	Überprüfung der Energiebilanz.....	58
5.5	Flammentemperatur.....	61
5.6	Typischer Verlauf der Verbrennung einer Charge Holz.....	63

<b>6</b>	<b>Modellierung der Feuerung.....</b>	<b>71</b>
6.1	Verhalten der unregelten Feuerung.....	71
6.1.1	Feste Luftzufuhr über einen ganzen Abbrand.....	71
6.1.2	Variation des Luftüberschusses.....	73
6.2	Beschreibung der Verbrennungsqualität.....	76
6.2.1	Messung der Verbrennungsqualität.....	76
6.3	Luftzufuhr.....	78
6.3.1	Primärluftzufuhr.....	79
6.3.2	Sekundärluftzufuhr.....	82
6.3.3	Luftzufuhr in der Ausbrandphase.....	84
6.3.4	Wahl der Stellgröße.....	85
6.4	Zusammenhang zwischen der Primärluft und der Flammentemperatur.....	86
6.4.1	Messung der Geschwindigkeit des Glutwachstums.....	91
<b>7</b>	<b>Verbrennungsregelung.....</b>	<b>93</b>
7.1	Flammentemperatur.....	93
7.1.1	Verlauf der Energieverteilung.....	93
7.1.2	Veränderung der Holzzusammensetzung.....	95
7.1.3	Verlauf der Flammentemperatur.....	96
7.1.4	Einfluss der Holzqualität auf die Flammentemperatur.....	98
7.1.5	Sollwert der Flammentemperatur.....	101
7.2	Primärluftregelsystem.....	102
7.2.1	Sensitivitätsanalyse.....	102
7.2.2	Wahl der Regelung.....	103
7.2.3	Wahl der Reglerparameter.....	107
7.3	Zeitdiskretes Modell.....	109
7.3.1	Regelalgorithmus.....	113
7.4	Verbrennungsqualität der geregelten Feuerung.....	114

<b>8</b>	<b>Steuerung des Betriebsablaufs.....</b>	<b>125</b>
8.1	Vollständiger Abbrandzyklus.....	125
8.1.1	Startphase.....	126
8.1.2	Normale Verbrennungsphase.....	128
8.1.3	Glütherhaltungsphase.....	132
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>133</b>
9.1	Schlussfolgerungen.....	133
9.1.1	Leistungsmodulation bei Stückholzfeuerungen mit unterem Abbrand.....	133
9.1.2	Verhalten einer Stückholzfeuerung mit unterem Abbrand bei konstanter Luftzufuhr.....	134
9.1.3	Flammentemperatur einer Holzfeuerung.....	135
9.1.4	Beeinflussung des Luftüberschusses einer Stückholz- feuerung.....	136
9.1.5	Reaktion der Verbrennung auf eine Veränderung der Primärluftzufuhr.....	137
9.1.6	Auswirkungen der Flammentemperaturregelung.....	137
9.1.7	Anwendung der Flammentemperaturregelung bei Hack- schnittzellefeuerungen.....	138
9.2	Anforderungen an die Feuerungskonstruktion.....	139
9.3	Offene Fragen.....	140
<b>10</b>	<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>143</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>
	Lebenslauf.....	151

### III Zusammenfassung

---

Nur bei vollständiger Verbrennung bleiben die Emissionen einer Feuerung gering. Bei unregelmässigen Stückholzfeuerungen stellt sich das Problem, dass die Verbrennung nur während kurzen Zeitabschnitten einigermaßen vollständig verläuft. Weil sich die Holzzusammensetzung während dem Abbrand ändert und weil das Holz aus dem Füllschacht unregelmässig in die Glut nachrutscht, schwankt der Luftüberschuss und befindet sich dadurch oft in Bereichen einer schlechten Verbrennung. Deshalb drängt sich eine Regelung der Verbrennung auf, wenn die Emissionen verringert werden sollen.

Als Regelgrössen kommen verschiedene Gaskonzentrationen in Frage. Die Messung dieser Grössen ist jedoch aufwendig und teuer. Die Flammentemperatur steht in einem klaren Zusammenhang zum Luftüberschuss und bietet sich daher ebenfalls zur Regelung an. Obwohl auch noch andere Einflüsse als nur der Luftüberschuss die Flammentemperatur bestimmen, ergibt eine Regelung der Verbrennung auf eine bestimmte Flammentemperatur trotzdem eine gute Stabilisierung des Luftüberschusses. Die Flammentemperatur ist einfach und zuverlässig zu messen und ermöglicht eine gute Verbrennungsregelung.

Mögliche Stellgrössen zur Regelung sind nur die Primär- und Sekundärluftzufuhr. Die Sekundärluft ermöglicht eine schnelle Beeinflussung des Luftüberschusses; aber nur die Primärluft erreicht die Zone des nachrutschenden Holzes und ermöglicht damit eine Stabilisierung des Glutbettes. Deshalb soll bei Stückholzfeuerungen die Primärluft zur Regelung verwendet werden.

Der optimale Sollwert für die Flammentemperatur wurde aus vielen Messungen bei unterschiedlicher Leistung, mit Hart- und Weichholz sowie verschiedenen Holzfeuchtigkeiten bestimmt. Es zeigte sich, dass der Sollwert nur an die Feuerungsleistung angepasst werden muss; die Holzfeuchtigkeit und Holzart beeinflussen die optimale Flammentemperatur nicht. Anstelle der Leistung genügt auch die Sekundärluftzufuhr zur Berechnung des Sollwertes.

Als Regelalgorithmus kann der klassische Proportional-Integral Regler verwendet werden. Ein Differentialanteil ist für eine gute Regelung nicht erforderlich.

Aus einigen Schrittantworten der Flammentemperatur, bei Veränderung der Primärluftzufuhr, leiteten wir ein einfaches Modell für die Verbrennung ab. Anhand von Simulationsrechnungen bestimmten wir damit geeignete Werte für die Regelparameter, d. h. die Proportionalkonstante und Integrationszeitkonstante. Weil der Regelalgorithmus auf einem Prozessrechner implementiert werden soll, formten wir unser Modell für den zeitdiskreten Fall um und bestimmten wiederum durch

### III Zusammenfassung

Simulationen die maximale Abtastzeit für die Regelung. Die gewählten Parameter sind  $0.5 \text{ (m}^3/\text{h)/}^\circ\text{C}$  für die Proportionalkonstante, 300 s Integrationszeit sowie 1 s Abtastzeit.

Die mit dieser Regelung durchgeführten Versuche zeigen eine deutliche Verbesserung der Verbrennung. Diese verläuft nun während fast der ganzen Dauer eines Abbrandzyklus so vollständig wie in den besten Momenten der Verbrennung ohne Regelung. Die Kohlenmonoxidemissionen konnten reproduzierbar auf Mittelwerte von etwa  $500 \text{ mg/m}^3$  während 15 h Abbrandzeit gesenkt werden, und dies sogar trotz dem Variieren der Feuerungsleistung zwischen 10 und 20 kW. Auch rutscht das Holz gleichmässiger aus dem Füllschacht nach.

Zusätzlich zur Regelung wurde ein Anfahr- sowie ein Abstellalgorithmus in unseren Prozessregler einprogrammiert, so dass nun der ganze Betrieb der Feuerung automatisch abläuft. Nach einmaligem Anfeuern braucht der Betreiber während Wochen nur noch einmal am Tag Holz nachzufüllen, ohne wieder anzuzünden. Dies gelingt, weil die Feuerung im abgestellten Zustand praktisch luftdicht abgeschlossen ist und die Restglut thermisch gut isoliert konserviert wird. Durch diese Betriebsweise werden die Anfahr- und Ausbrandphasen beträchtlich verkürzt und deshalb sind die Emissionen während diesen Phasen geringer.

## IV Abstract

---

Log-wood furnaces with constant-flow air supply have complete combustion only during short periods. Variable wood composition and irregular descending of the wood into the pyrolysis zone cause the air excess to vary and leads to incomplete combustion over long periods. Hence to reduce emissions, control of the combustion is needed.

As a control variable, various concentrations of flue gases can be used ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ), but these measurements need expensive equipment. Because there is a clear relationship between the flame temperature and the air excess the former may also be used as a control variable. Although the air excess is not the only parameter determining the flame temperature, keeping the flame temperature stable reduces the variation in the air excess and hence reduces the emissions.

Only the primary and secondary air can be used as a controlled variable. Controlling the secondary air has a more immediate impact on the air excess, but only the primary air reaches the pyrolysis zone and can influence the quantity of embers. Hence, to control a log-wood furnace primary air should be used.

The setpoint of the flame temperature has been determined through extensive measurements burning soft- and hardwood of various humidities and at different power levels. It is shown that the optimal setpoint depends only from the power level of the furnace, and is independent of humidity and type of wood.

A normal proportional-integral controller is sufficient to achieve good performance. Based on the step responses of the flame temperature a simple model of the combustion was constructed. The parameters of the controller were found by simulation; a gain of  $0.5 \text{ (m}^3/\text{h)/}^\circ\text{C}$  and 300 s integrating time gave the best results. In a time-discrete implementation a sampling time of 1 s was found to be fast enough.

The results of many measurements made with this controller show a significant improvement in the combustion quality, which is now consistently as good as was obtained only in the best moments of the uncontrolled furnace. Carbon-monoxide emissions can be reduced in a reproduceable manner to an average of  $500 \text{ mg/m}^3$  during 15 hours of burning, although the power was varied from 10 to 20 kW. Also, descending of the stacked wood becomes more regular.

Procedures to start and shut down the combustion allow automatic operation of the furnace. For a period of weeks it is only necessary to feed the furnace with wood once a day. During the stand-by period the air supply is completely shut off and good thermal insulation keeps the embers glowing until it is next filled up. This operating mode shortens the ignition and burn-out phases and further reduces the emissions.

## V Résumé

---

Afin de maintenir à un minimum les émissions des chaudières à bûches, il faut garantir une combustion complète. Sans réglage, les variations de la composition du bois, la descente irrégulière dans la braise, provoquent des variations de l'excès d'air qui se trouve alors souvent en dehors du domaine de combustion complète. Pour réduire les émissions un réglage de la combustion est donc nécessaire.

Comme grandeurs à régler, les concentrations des gaz de la fumée ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ) seraient bien appropriées, mais leurs mesures sont trop coûteuses. La température de la flamme présente une nette corrélation avec l'excès d'air et peut aussi être utilisée. De plus elle est facile à mesurer. Malgré le fait que la température de la flamme ne dépende pas seulement de l'excès d'air, le réglage de celle-ci permet une stabilisation de ce dernier et offre une bonne régulation de la combustion.

Comme grandeur de réglage, on peut choisir le débit d'air primaire ou secondaire. L'air secondaire agit rapidement sur l'excès d'air, mais seul l'air primaire arrive à la zone de pyrolyse et permet une stabilisation de la braise. Ainsi, pour le contrôle d'une chaudière à bûches, l'air primaire doit être la grandeur de réglage.

La consigne de température de la flamme a été déterminée à la suite de beaucoup d'essais réalisés avec du bois de feuillus et de sapin, d'humidité variable et à différentes puissances de chauffage. Nous avons démontré que cette consigne doit être une fonction de la puissance, mais qu'elle est indépendante de l'humidité du bois.

Nous avons déduit un modèle simple de la combustion à partir des réponses indicielles de la température de la flamme. Un régulateur proportionnel-différentiel suffit pour le réglage. Par simulation, nous avons trouvé les valeurs optimales de ce régulateur: le gain est  $0.5 \text{ (m}^3/\text{h)/}^\circ\text{C}$  et le temps d'intégration est 300 s. Pour une réalisation numérique, une période d'échantillonnage de 1 s est suffisante.

Les résultats des mesures effectuées avec ce système de contrôle montrent une nette amélioration de la combustion. Celle-ci reste pendant tout le cycle aussi bonne que celle des meilleurs moments pour une chaudière sans réglage. Les émissions de monoxyde de carbone ont été réduites à  $500 \text{ mg/m}^3$  pendant une période de combustion de 15 heures, ceci d'une manière reproductible et malgré des variations de la puissance entre 10 et 20 kW. Le bois descend aussi plus régulièrement dans la braise.

Des programmes d'allumage et d'extinction permettent un fonctionnement automatique de la chaudière, l'utilisateur n'a qu'à remplir le réservoir de bois une fois par jour. À l'état éteint, l'apport d'air est étanche et l'isolation thermique conserve la braise jusqu'au prochain remplissage. Ceci permet d'écourter les temps d'allumage et de terminaison de la combustion réduisant ainsi les émissions.

# 1 Motivation und Zielsetzung

---

## 1.1 Stand heutiger Holzfeuerungen

In der Kette der Holzverwertung fällt auf allen Stufen Restholz an, welches nur noch zur Energiegewinnung genutzt werden kann [1]. Bei der Verbrennung dieses Holzes ist folgendes anzustreben:

- Die im Holz enthaltene Energie soll möglichst gut verwertet werden.
- Es sollen möglichst wenig schädliche Emissionen entstehen [2].

Die Erfüllung dieser beiden Ziele erfordert vor allem eine *vollständige* Verbrennung des Holzes. Leider wird dieses Ziel heute nur selten erreicht. Einerseits haben Untersuchungen von Marutzky und Schriever [3] sowie Nussbaumer [4] gezeigt, dass die heute für die Holzverbrennung verwendeten Feuerungen oft keine vollständige Verbrennung erlauben. Andererseits ist bei konventionellen, unregelmäßigem Holzfeuerungen das Verhalten des Bedieners sehr wichtig, da er die nötigen Manipulationen wie Holzauflegen und Einstellen der Klappen mit viel Gefühl und Erfahrung durchführen müsste. Weil viele Benutzer den Umgang mit Holzfeuerungen nicht mehr gewohnt sind, werden deren Feuerungen auch noch schlecht betrieben, selbst wenn sie von der Konstruktion her eine gute Verbrennung zulassen.

Holzfeuerungen haben nicht zuletzt deshalb einen schlechten Ruf bekommen, weil deren Weiterentwicklung während Jahrzehnten vernachlässigt wurde [5]. Energie, in der Schweiz vorwiegend aus Erdöl gewonnen, war billig und Umweltschutz noch kein Thema. In den letzten Jahren konnten hingegen die Emissionen von modernen Ölfeuerungen unter dem Druck der schärferen Luftreinhaltevorschriften bedeutend gesenkt werden. Dieser technische Fortschritt sollte auch bei der Holzverbrennung möglich sein.

Weil die Holzfeuerungen meist durch kleine Betriebe hergestellt werden, steht ein insgesamt nur recht kleines Budget zur Entwicklung neuer Feuerungstechniken zur Verfügung. Gerade hier sehen wir den Nutzen unseres Forschungsprojektes, die Verbrennung in einer modernen Stückholzfeuerungen mit Hilfe einer rückgekoppelten Regelung zu verbessern und den Bedienungscomfort zu erhöhen.

## 1.2 Rahmenbedingungen und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit bezieht sich grundsätzlich auf eine bestimmte, unkonventionelle Feuerung der Firma Tiba. Diese Feuerung wurde im Rahmen des Projektes etliche Male umgebaut bzw. neu konzipiert, um ganz speziellen Anforderungen der Regelbarkeit zu genügen. Insbesondere wurde der Dichtheit grosse Beachtung geschenkt. Dass die Feuerung imstande war, Holz äusserst sauber zu verbrennen, haben schon die Versuche mit den ersten Prototypen gezeigt. Diese guten Resultate werden jedoch nur in einem relativ engen Bereich des Luftüberschusses erreicht. Eine Regelung der Verbrennungsqualität drängte sich deshalb geradezu auf, um die spezifischen Vorteile der Feuerung nutzen zu können.

Heutige Sensoren zur Messung der Schadstoffemissionen oder des Luftüberschusses sind viel zu teuer und dabei oft zu unzuverlässig, um in eine Einfamilienhausfeuerung eingebaut zu werden. Deshalb wurde in einer ersten Phase des Projektes ein Parameter zur Charakterisierung der Verbrennungsqualität gesucht. Dieser sollte billig und zuverlässig zu messen sein. In der zweiten Phase hat dieser Parameter eine Regelung der Verbrennung ermöglicht, welche folgende Kriterien erfüllt:

- Durchgehend gute Verbrennung in allen Leistungsbereichen sowie auch bei Leistungsänderungen.
- Verbesserung der Anfeuer- und Abstellphasen mit insgesamt möglichst wenig Kohlenmonoxid-Emissionen.
- Guter Gesamtwirkungsgrad der Feuerung.

Die entwickelte Regelung soll gleichzeitig den Bedienungskomfort der Feuerung verbessern.

## 2 Grundlagen

---

### 2.1 Holz als Brennstoff

Der Anteil der Holzenergie am gesamten Endenergieverbrauch der Schweiz betrug 1989 1.5 % [6]. Damit ist das Holz nach der Wasserkraft der zweitwichtigste inländische Energieträger. Durch vermehrte Waldpflege wäre der Anteil der Holzenergie ohne Gefährdung der Waldsubstanz problemlos auf 4 bis 5 % zu steigern.

Zu den Vorteilen der Holzenergie zählen der dezentrale Anfall des Holzes und damit die kurzen Transportwege. Zudem bleiben fast alle bei der Energiegewinnung umgesetzten Stoffe in einem Kreislauf: Der Wasserstoff sowie der Sauerstoff werden zu Wasser und dieses nährt wiederum den Wald. Kohlenstoff aus dem Holz wird bei der Verbrennung zu Kohlendioxid oxidiert, welches von den Bäumen wieder aufgenommen und in die Holzsubstanz eingelagert wird. Die Holzverbrennung trägt also nicht zum Treibhauseffekt bei, welcher vor allem durch die Freisetzung von Kohlendioxid bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht. Zudem enthält Holz kaum Schwefel, bei der Verbrennung entsteht folglich wenig Schwefeldioxid [7].

Zu den Nachteilen der Holzenergie zählen die beim heutigen Stand der Technik noch höheren Stickoxidemissionen im Vergleich zu modernen Ölfeuerungen [4]. Nachteilig wirken sich auch die hohen Kosten für den Holzschlag aus. Letzteres sowie die niedrigen Ölpreise dämpfen die Nachfrage nach dem Energieträger Holz. Die Konkurrenzfähigkeit des Holzes ist jedoch auch von politischen Entscheidungen abhängig. Die Erträge aus dem Holzverkauf reichen kaum noch aus, um den stark durch die Luftverschmutzung geschädigten Wald zu pflegen. Beiträge aus dem Treibstoffzollzuschlag oder von der Öffentlichen Hand an die Waldpflege können den Holzpreis senken, und eine zukünftig mögliche Besteuerung fossiler Energieträger würde den Ölpreis erhöhen (Ökobonus).

## 2.2 Holzzusammensetzung

Um Holz verbrennen zu können, muss man nicht unbedingt die Strukturformeln der Holzbestandteile Lignin und Hemizellulose kennen. Trotzdem ist es sinnvoll, sich mit einigen für die Verbrennung wichtigen Merkmalen des Holzes zu beschäftigen. Laub- und Nadelholz unterscheiden sich in bezug auf die Verbrennung im wesentlichen durch ihre unterschiedliche Dichte. Die Rohdichte wird auf trockenes Holz bezogen und beträgt für Laubholz ca.  $680 \text{ kg/m}^3$ , für Nadelholz ca.  $510 \text{ kg/m}^3$ . Trotz des verschiedenen strukturellen Aufbaues ist die elementare Zusammensetzung von Laub- und Nadelholz praktisch gleich (siehe Tabelle 2.1).

Gew.- %	Kohlenstoff	Wasserstoff	Sauerstoff	Rest
Laubholz	49.0	6.0	44.6	0.4
Nadelholz	50.7	6.2	42.9	0.2
Mittelwert	50	6	44	

Atom-%	Kohlenstoff	Wasserstoff	Sauerstoff	Rest
Laubholz	31.7	46.5	21.6	0.2
Nadelholz	32.2	47.3	20.4	0.1
Mittelwert	32.3	46.4	21.3	

Tabelle 2.1: Elementare Zusammensetzung von Holz nach [8].

Als chemische Summenformel erhält man aus den obenstehenden Mittelwerten  $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$ . Der für uns wichtigste Parameter des Holzes ist der *Heizwert*, d. h. die Energie, die bei einer vollständigen Verbrennung frei wird, wobei das Verbrennungswasser in den Abgasen gasförmig vorliegt (unterer Heizwert). Die Kondensationswärme des Verbrennungswassers wird in der Regel nicht genutzt.

Der Heizwert hängt stark von der in der Holzstruktur gebundenen Wassermenge ab. Diese erfassen wir mit der folgenden Definition der *Holzfeuchtigkeit*  $u$ :

$$\text{Holzfeuchtigkeit } u = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse trockenes Holz}} \quad [-] \quad (2.1)$$

Meist wird die Holzfeuchtigkeit in % angegeben. Ohne explizite Prozentangabe nehmen wir sonst immer das Massenverhältnis an.

Zur Vollständigkeit geben wir hier noch die Definition des Wassergehaltes  $w$  an:

$$\text{Wassergehalt } w = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse feuchtes Holz}} = \frac{u}{1 + u} \quad [-]$$

Wir verwenden hier jedoch ausschliesslich die Holzfeuchtigkeit  $u$ .

Feuchtigkeit [%]	0	10	20	30	40	50
Heizwert [MJ/kg]	18.5	16.6	15.0	13.7	12.5	11.5

Tabelle 2.2: Heizwert in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit [8].

Die Holzfeuchtigkeit ist ein kritischer Parameter für die Verbrennung; die geringere Energiedichte von feuchtem Holz ermöglicht oft keine genügende Temperatur mehr für eine vollständige Verbrennung.

Für die Schadstoffemission ist auch der Stickstoffgehalt des Holzes wichtig, da die bei der Verbrennung entstehenden Stickoxide vorwiegend aus dem Holzstickstoff stammen [9]. Die Werte für den Stickstoffgehalt aus der Literatur schwanken von 0.0 bis 0.2 Gewichtsprozent (Spanplatten bis 3%) [10].

Der Schwefelgehalt von Holz ist unbedeutend, er liegt zwischen 50 und 400 ppm [11]. Hierbei ist die Lagerung wichtig; liegt Holz im Freien, erhöht sich dessen Schwefelgehalt unter Umwelteinflüssen wie zum Beispiel saurem Regen. Bei der Holzverbrennung stellen die Schwefeldioxidemissionen in der Regel kein Problem dar.

### 2.3 Verbrennung

Die Verbrennung von Holz verläuft in vier Phasen, welche durch die Eigenschaften des Holzes vorgegeben sind:

**Trocknung:** Bei Temperaturen bis ca. 150 °C trocknet das Holz. Das in der porösen Struktur vorhandene Wasser verdampft und diffundiert oder strömt in die Umgebung. Dieser Prozess verläuft endotherm, bis zur vollständigen Trocknung wird ein Temperaturanstieg des Holzes stark gebremst.

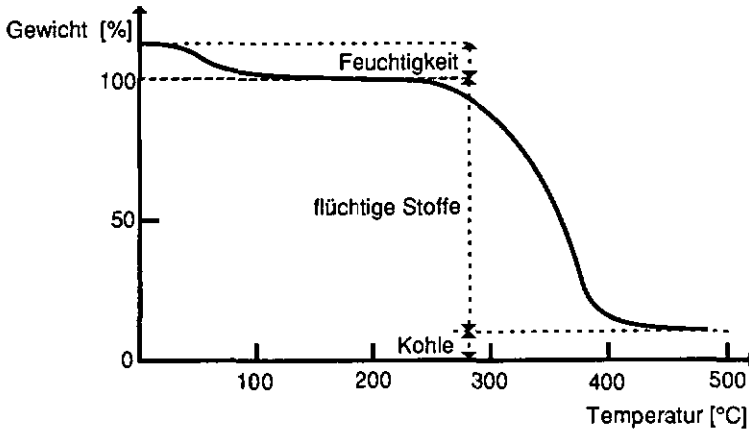
**Pyrolyse:** Bei Temperaturen von ca. 200 °C bis 600 °C werden die flüchtigen Bestandteile des Holzes vergast (Pyrolyse). Diese Bestandteile machen ungefähr 85 % der gesamten Holzmasse aus. Die Pyrolyse ist teilweise endotherm (aufbrechen von chemischen Bindungen). Ein Teil der Pyrolyseprodukte (CO, Kohlenwasserstoffe) reagiert mit dem in der Glut oder im Holz vorhandenen Sauerstoff unter Wärmeabgabe. Diese exothermen Prozesse stehen mit den endothermen Vergasungsreaktionen in einem Gleichgewicht, welches wesentlich durch die Sauerstoffzufuhr in die Glut kontrolliert wird. Die Wärmeleitung im Holz sowie Diffusionsprozesse an der Holzoberfläche begrenzen dabei die Reaktionsgeschwindigkeit.

**Flamme:** Bei Temperaturen bis zu theoretisch 2000 °C (in Luft) verbrennen die produzierten Holzgase in der Flamme, wenn ihnen nach dem Verlassen der Glut genügend Sauerstoff zugeführt wird. Bei zu grosser Luftzufuhr kühlt die Flamme ab, dadurch wird die Aktivierungsenergie eines Teils der Oxidationsreaktionen unterschritten; die Verbrennung bleibt unvollständig.

**Kohleverbrennung:** Nach der vollständigen Pyrolyse verbrannt die verbleibende Holzkohle unter starker Wärmeabgabe.

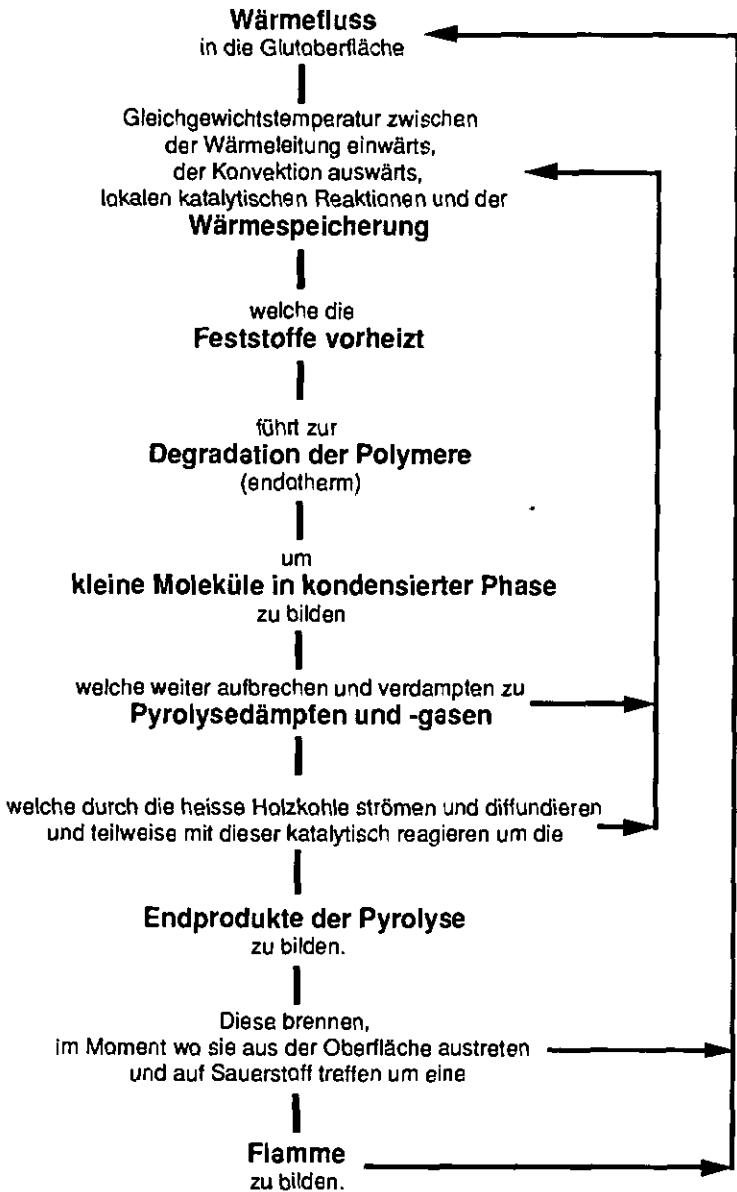
Zur Illustration der Trocknungs- und Pyrolyseprozesse ist in Figur 1.1 eine typische Thermogravimetrieurve abgebildet. Bei der Thermogravimetrie misst man das Gewicht einer Probe während sie erhitzt wird. Diese Experimente können mit verschiedener Geschwindigkeit und in unterschiedlichen Atmosphären durchgeführt werden. Die resultierende Kurve gibt Aufschluss über die Pyrolysereaktionen bei der jeweiligen Temperatur und Sauerstoffkonzentration. Hier sieht man deutlich zuerst die Trocknung des Holzes bis ca. 150 °C, mit dem Gewichtsverlust, welcher der Feuchtigkeit der Holzprobe entspricht. Ab 250 °C verliert die Probe rasch an Gewicht, bei 500 °C sind die flüchtigen Stoffe vergast (Pyrolyse). Der Anteil der flüchtigen Stoffe im Holz beträgt ca. 85 % der trockenen Holzmasse.

Dieser Wert hängt aber stark von den Bedingungen während der Pyrolyse ab, z. B. von der Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs und von der Sauerstoffkonzentration der die Probe umgebenden Atmosphäre.



Figur 1.1: Typische Thermogravimetrieurve von feuchtem Holz [12]

Die Prozesse *Trocknung*, *Pyrolyse*, *Verbrennen der Gase in der Flamme* und *Verbrennen der Holzkohle* lassen sich bei der praktischen Holzverbrennung nicht strikt trennen. Es treten Wechselwirkungen zwischen allen Prozessen auf, welche durch das Ablaufschema in Figur 1.2 dargestellt werden können [12]:



Figur 1.2: Vereinfachte Übersicht über die Prozesse und ihre Wechselwirkungen bei der Holzverbrennung [12].

## 2.4 Konstruktion einer Stückholzfeuerung

In einer alten Durchbrandfeuerung verlaufen alle oben beschriebenen Prozesse in einer Brennkammer und mit dem gesamten Holzvorrat. Die Verbrennungswärme der Flamme strahlt direkt auf die Glut zurück und facht dort die Pyrolyse an. Mehr Holzgase erzeugen dabei eine grössere Flamme, welche wiederum mehr Verbrennungsluft ansaugt. Eine derartige Feuerung brennt äusserst impulsiv und befindet sich lange Zeit in schlechten Verbrennungsphasen mit hohen Emissionen [13][14].

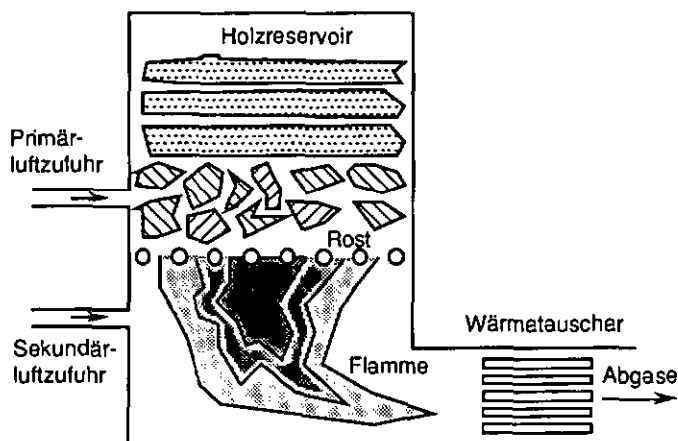
Bei automatischen Feuerungen, wo das Holz annähernd kontinuierlich zugeführt wird, kann die Grösse der Glut durch die Holzzufuhr begrenzt werden, während bei einer Stückholzfeuerung alles verfügbare Holz zusammen im Füllschacht liegt.

***Der lokal verfügbare Sauerstoff sowie die herrschenden Temperaturen bestimmen, ob sich die Glut auf den gesamten Holzvorrat ausdehnt, d. h. ob das Holz im Füllschacht nur getrocknet oder bereits mehr oder weniger intensiv vergast wird.***

Durch eine konstruktive Trennung der Pyrolysezone von der Flamme kann man die Wärmerückstrahlung von der Flamme in die Glut begrenzen. Dazu kann bei einer Stückholzfeuerung der Abbrand nach unten verlegt werden, so dass die Flamme nach unten brennt und nicht mehr den ganzen Holzvorrat durchströmt (siehe Figur 1.3). Die Schwerkraft lässt dann automatisch das Holz in die Glut nachrutschen. Die wichtigste Verbesserung dieser Konstruktion besteht in einer teilweisen örtlichen Trennung der Verbrennungsprozesse. Der Abbrand wird bedeutend gleichmässiger und besser kontrollierbar; die Wärme wird langsamer freigesetzt.

Ein wassergekühlter Füllschacht verhindert das Brennen des gesamten Holzvorrats, ohne aber eine Vortrocknung des Holzes zu verhindern. Ein möglichst grosser Füllschacht ermöglicht grössere Intervalle zwischen dem Auffüllen und verbessert damit den Bedienungskomfort.

Die in die Glut zugeführte Luft heisst *Primärluft*. Diese Primärluft facht die Vergasung in der Glut an. Durch eine Begrenzung der Primärluft kann die Verbrennung unter Kontrolle gehalten werden, bei richtiger Luftzufuhr stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den endo- und exothermen Prozessen im Glutbett ein. Bedingung dabei ist, dass nirgends Gase unkontrolliert ein- oder ausströmen können.



Figur 1.3: Schema einer Holzfeuerung mit unterem Abbrand.

Der Rost bildet die Trennung zwischen der Glut und der Flamme. Zur Verbrennung der Holzgase mischt man diesen nach dem Rost die sogenannte *Sekundärluft* bei. Eine gute thermische Isolierung des Ausbrandbereichs der Flamme sichert die zur vollständigen Verbrennung nötigen Temperaturen. Konstruktiv muss unbedingt darauf geachtet werden, dass *alle* erzeugten Holzgase die heisse Flammenzone durchströmen und gut mit genügend Luft durchmischt werden. Eine gute geometrische Gestaltung der Flammenzone garantiert eine genügende Verweilzeit der Verbrennungsgase und kann die Durchmischung noch fördern.

Erst nach dem vollständigen Verbrennen aller Holzgase sollten die heissen Gase den Wärmetauscher erreichen, wo ihnen ein möglichst grosser Teil der Energie entzogen wird. Normalerweise werden die Gase nur soweit gekühlt, dass noch keine Kondensation der Feuchtigkeit im Kamin stattfindet. Energetisch wäre es aber von Vorteil, die Verbrennungsgase fast bis auf die Rücklauftemperatur des Heizkreislaufs zu kühlen. Dabei könnte die Kondensationswärme des Wasserdampfes aus den Abgasen gewonnen werden. Bei unvollständiger Verbrennung kondensieren dabei leider auch Kohlenwasserstoffe; diese verschmutzen den Wärmetauscher und verschlechtern damit dessen Wärmeübergang.

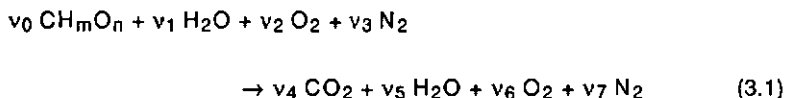
## 3 Verbrennungsrechnung

---

### 3.1 Verbrennungsgleichung und Luftüberschuss

Aus der Reaktionsgleichung der vollständigen Verbrennung von feuchtem Holz zu Kohlendioxid, Stickstoff, Sauerstoff und Wasser lassen sich wichtige Größen ableiten.

Wir verbrennen  $v_0$  Mol Holz der chemischen Zusammensetzung  $\text{CH}_m\text{O}_n$  mit dem zusätzlichen Gehalt an  $v_1$  Mol Wasser. Trockenes Holz der Zusammensetzung 50 % C, 6 %  $\text{H}_2$  und 44 %  $\text{O}_2$  (Gewichtsprozente) entspricht beispielsweise einem "Holzmolekül"  $\text{CH}_{1.44}\text{O}_{0.66}$ . Die zugeführten  $v_2$  Mol Sauerstoff werden noch von  $v_3$  Mol Stickstoff aus der Luft begleitet, welcher nicht an der Reaktion teilnimmt. Dabei nehmen wir an, die Luft bestehe nur aus Sauerstoff und Stickstoff. Die Reaktionsgleichung lautet also:



Der Koeffizient  $v_1$  lässt sich nach der Definitionsgleichung (2.1) aus der Holzfeuchtigkeit  $u$ , der Molmasse des "Holzmoleküls"  $M_{\text{Holz}}$  [kg/kmol] und derjenigen von Wasser  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  [kg/kmol] berechnen:

$$v_1 = u \frac{M_{\text{Holz}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} v_0 \quad (3.2)$$

Aus der Zusammensetzung der Luft mit 79 Vol.-%  $\text{N}_2$  und 21 Vol.-%  $\text{O}_2$  ergibt sich für das Verhältnis  $v_3 / v_2$ :

$$v_3 = 3.76 v_2 \quad (3.3)$$

Aus den Stoffbilanzen erhält man die 4 Koeffizienten der Produktseite:

$$v_4 = v_0 \quad (3.4)$$

$$v_5 = \frac{m}{2} v_0 + v_1 \quad (3.5)$$

$$v_6 = v_2 - v_0 \left( 1 + \frac{m}{4} - \frac{n}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$v_7 = v_3 \quad (3.7)$$

### 3 Verbrennungsrechnung

Zur vollständigen Verbrennung von  $v_0$  Mol Holz  $\text{CH}_m\text{O}_n$  sind somit mindestens  $v_0 \left(1 + \frac{m}{4} - \frac{n}{2}\right)$  Mol  $\text{O}_2$  erforderlich. Deshalb definieren wir zur Vereinfachung die folgenden charakteristischen Holzkonstanten:

$$A = 1 + \frac{m}{4} - \frac{n}{2} \quad \text{ sowie } a = \frac{1}{A} \quad (3.8)$$

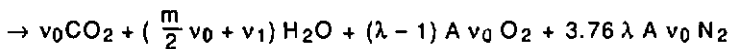
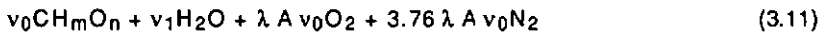
Hieraus ergibt sich der Begriff des **Luftüberschusses**  $\lambda$ : **Definition:**

$$\lambda = \frac{\text{real zugeführte Luftmenge}}{\text{zur stöchiometrischen Verbrennung notwendige Luftmenge}} \quad (3.9)$$

Daraus ergibt sich der letzte Koeffizient der Verbrennungsgleichung:

$$v_2 = \lambda A v_0. \quad (3.10)$$

Mit den Gleichungen (3.3) bis (3.10) erhält man aus (3.1) die **Reaktionsgleichung für die Verbrennung von  $v_0$  "Holzmolekülen"**:



### 3.2 Messung des Luftüberschusses:

Eine kontinuierliche, direkte Messung des Luftüberschusses nach der Definitionsgleichung (3.9) ist nicht möglich. Aus einer Messung der  $\text{CO}_2$ - oder  $\text{O}_2$ -Konzentration in den Abgasen lässt sich aber der Luftüberschuss berechnen, wenn man berücksichtigt, dass man meist nur die trockenen Abgase in die Gasanalysatoren leitet. Die Feuchtigkeit der Abgase wird vor dem Messgerät auskondensiert. Aus (3.11) erhalten wir die trockene Abgasmenge:

$$v_0 + (\lambda - 1) A v_0 + 3.76 \lambda A v_0 = v_0 (1 + 4.76 A \lambda - A) \quad [\text{mol}]$$

Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt  $\{\text{CO}_2\}$  darin ist ( $a = \frac{1}{A}$ ):

$$\{\text{CO}_2\} = \frac{v_0}{v_0 (1 + 4.76 A \lambda - A)} = \frac{1}{a + 4.76 \lambda - 1} \quad [-]$$

Aufgelöst nach  $\lambda$  ergibt sich der **Luftüberschuss** aus dem **CO<sub>2</sub>-Volumenanteil** {CO<sub>2</sub>} der trockenen Abgase zu:

$$\lambda = 0.21 \left( \frac{a}{\{\text{CO}_2\}} + 1 - a \right) \quad [-] \quad (3.12)$$

Der O<sub>2</sub>-Gehalt {O<sub>2</sub>} in den trockenen Abgasen ist:

$$\{\text{O}_2\} = \frac{(\lambda - 1) A v_0}{v_0 (1 + 4.76 A \lambda - A)} = \frac{\lambda - 1}{a + 4.76 \lambda - 1} \quad [-]$$

Aufgelöst nach  $\lambda$  ergibt sich der **Luftüberschuss**  $\lambda$  aus dem **O<sub>2</sub>-Volumenanteil** {O<sub>2</sub>} der trockenen Abgase zu:

$$\lambda = \frac{1 - \{\text{O}_2\} (1 - a)}{1 - \{\text{O}_2\} 4.76} \quad [-] \quad (3.13)$$

**Einschränkung:** Die Formeln (3.12) und (3.13) gelten nur für  $\lambda \geq 1$ , d. h. für überstöchiometrische Verbrennung. Ebenfalls muss strenggenommen eine vollständige Verbrennung vorliegen. Kleine Mengen an Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid in den Verbrennungsprodukten (<<1%) können jedoch in der Praxis toleriert werden.

Nebenbei erhält man aus der Addition des CO<sub>2</sub>- und des O<sub>2</sub>-Gehaltes:

$$\{\text{CO}_2\} + \{\text{O}_2\} = \frac{\lambda}{a + 4.76 \lambda - 1} = \frac{1}{\frac{(a-1)}{\lambda} + 4.76} \quad [-] \quad (3.14)$$

Weil für Holz  $a=1$  ist, bleibt die Summe von Kohlendioxidkonzentration und Sauerstoffkonzentration in den trockenen Abgasen beinahe konstant bei 21 %; sie ändert sich nur wenig mit dem Luftüberschuss.

### 3 Verbrennungsrechnung

#### 3.2.1 Vereinfachte Formeln

Unter der Annahme einer Holzzusammensetzung von  $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$  erhalten wir die Holzkonstante  $a = 0.97$ .

Bei Vernachlässigung des Terms  $0.21(1 - a) \approx 0.006$  erhalten wir dann aus Formel (3.12) näherungsweise:

$$\lambda = \frac{0.21a}{\{\text{CO}_2\}} \quad [-] \quad (3.12b)$$

Weil der Sauerstoffgehalt der Abgase  $\{\text{O}_2\}$  kleiner als 0.21 sein muss, können wir in Formel (3.13) den Term  $\{\text{O}_2\}(1 - a) \leq 0.006$  ebenfalls vernachlässigen. Wir erhalten:

$$\lambda = \frac{0.21}{0.21 - \{\text{O}_2\}} \quad [-] \quad (3.13b)$$

Der Beweis, warum die Formel (3.12b) die optimale Näherung darstellt, ist in [15] gegeben.

### 3.3 Adiabate Verbrennungstemperatur

Bei isobaren Zustandsänderungen entspricht der Wärmeumsatz  $\delta O$  der Änderung der Enthalpie  $\Delta h$ . Die Reaktionsenthalpie der Verbrennung von Holz zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  können wir aus dem Heizwert berechnen. Für trockenes Holz beträgt der Heizwert nach Tabelle 2.2 ca. 18.5 MJ/kg. Dies entspricht 455 MJ/kmol bei einem Molekulargewicht unseres "Holzmoleküls" von 24.6 kg/kmol. Da das Wasser die Feuerung nach der Verbrennung meist dampfförmig verlässt, müssen wir bei feuchtem Holz nach die Verdampfungswärme der Holzfeuchtigkeit von der Reaktionsenthalpie abziehen. Sie beträgt 44 MJ/kmol Wasser bei 20 °C. Die Verdampfungswärme des Verbrennungswassers brauchen wir nicht mehr abzuziehen, da wir ja die Enthalpie aus dem Heizwert von trockenem Holz berechnet haben.

$$\Delta h = 455 - 44 v_1/v_0 \quad [\text{MJ/kmol}_{\text{Holz,trocken}}] \quad (3.15)$$

$\Delta h$  = Enthalpie der Reaktion nach Gleichung (3.11)

Die freiwerdende Energie bewirkt eine Temperaturerhöhung der entstehenden gasförmigen Produkte. Unter der Annahme einer adiabaten Reaktion gilt:

$$v_0 \Delta h + \int_{T_u}^{T_p} \sum_{i=4}^7 v_i c_{pi}(T) dT = 0 \quad (3.16)$$

$T_u$  = Temperatur der Edukte (Umgebungstemperatur) [°C];

$T_p$  = Temperatur der Produkte = adiabate Verbrennungstemperatur [°C];

Die molaren Wärmekapazitäten  $c_{pi}$  [J/kmol K] der Verbrennungsgase bei konstantem Druck sind temperaturabhängig. Sie können relativ gut durch ein Polynom 3. Grades approximiert werden. Bezeichnen wir die Koeffizienten der Polynome mit  $c_{pi,0}$  bis  $c_{pi,3}$ , so erhalten wir für die Wärmekapazitäten:

$$c_{pi}(T) = c_{pi,0} + c_{pi,1} T + c_{pi,2} T^2 + c_{pi,3} T^3 \quad [\text{J/kmol K}]$$

und hiermit aus Gleichung (3.16):

$$v_0 \Delta h + \int_{T_u}^{T_p} \sum_{i=4}^7 v_i (c_{pi,0} + c_{pi,1} T + c_{pi,2} T^2 + c_{pi,3} T^3) dT = 0 \quad (3.17)$$

und integriert:

$$v_0 \Delta h + \sum_{i=4}^7 v_i (c_{pi,0} \Delta T + c_{pi,1} \Delta T^2 + c_{pi,2} \Delta T^3 + c_{pi,3} \Delta T^4) = 0 \quad (3.18)$$

wobei  $\Delta T = T_p - T_u$ ;

Die adiabate Verbrennungstemperatur  $T_F$  ergibt sich dann aus der Umgebungstemperatur  $T_u$ :

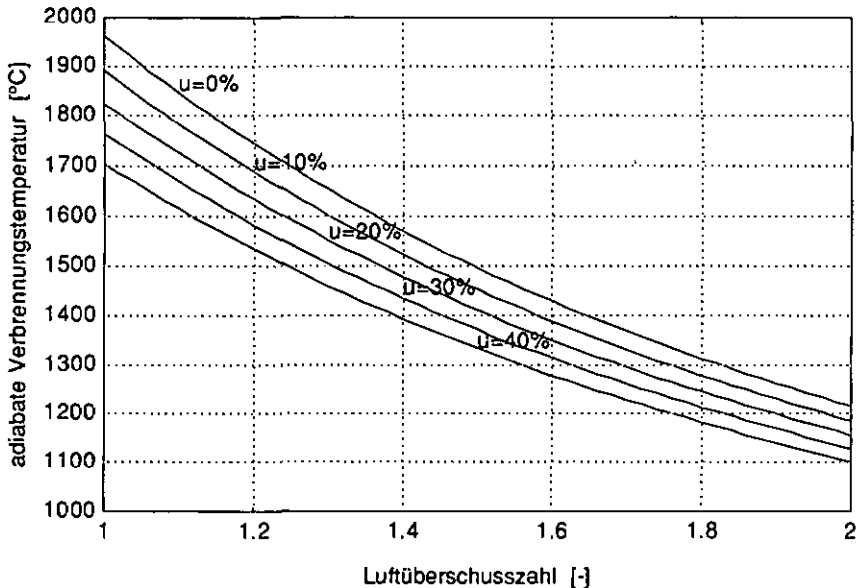
$$T_F = T_u + \Delta T.$$

Für eine Holzzusammensetzung  $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,7}$  (Holzkonstante  $a = 1$ ) sind die so berechneten Verbrennungstemperaturen für Luftüberschusszahlen  $\lambda$  von 1 bis 2 sowie Holzleuchten  $u$  von 0 bis 40 % (bezogen auf die trockene Holzmasse) in Figur 3.1 dargestellt. (Die Umgebungstemperatur  $T_u$  beträgt hier 0 °C).

Bei unvollständiger Verbrennung ist die Zusammensetzung der Verbrennungsprodukte nicht mehr definiert, der Bereich  $\lambda < 1$  wurde hier deshalb nicht behandelt. Es genügt für unsere Zwecke zu wissen, dass die Flammen-

### 3 Verbrennungsrechnung

temperaturen bei fortschreitendem Luftmangel wieder kleiner werden, weil die unvollständige Verbrennung weniger Energie freisetzt als die vollständige.



Figur 3.1 Adiabate Verbrennungstemperatur in Funktion des Luftüberschusses für Holzfeuchtigkeiten  $u$  von 0 – 40 % bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C.

#### 3.3.1 Messung der Verbrennungstemperatur

Die effektiv realisierten Verbrennungstemperaturen sind aufgrund von unvermeidbaren Verlusten bedeutend niedriger. Diese Verluste entstehen durch die Wärmeabgabe der Glut an die Ofenwände sowie Strahlung und Wärmeübertragung der Verbrennungsgase an den Flammenkanal.

Die gemessene Verbrennungstemperatur kann bei der Messung mit Thermoelementen wegen der Strahlungsverluste und der Wärmeableitung des Fühlers noch niedriger sein als die reale Temperatur der Verbrennungsgase in der Flamme.

Die Messung der Strahlung der Flamme zur Bestimmung der Verbrennungstemperatur ist problematisch, weil die Strahlung von Russteilen die Strahlung von Gasen weit überwiegt. Die Wärmestrahlung der Flamme wird damit vorwiegend von der Russbelastung bestimmt [16].

### 3.4 Luftbedarf, Abgas- und Wasserdampfmenge

Für einige Anwendungen ist es praktisch, die Verbrennungsgleichung auf die Verbrennung von 1 kg Holz statt  $v_0$  Mol "Holzmoleküle" zu beziehen. Aus der Zusammensetzung von Holz erhalten wir dessen Molmasse  $M_{\text{Holz}}$ :

$$M_{\text{Holz}} = M_C + m M_H + n M_O = (12 + m + 16n) \text{ kg/kmol} \quad (3.19)$$

$$M_C = \text{Molmasse C} = 12 \text{ kg/kmol}$$

$$M_H = \text{Molmasse H} = 1 \text{ kg/kmol}$$

$$M_O = \text{Molmasse O} = 16 \text{ kg/kmol}$$

Daraus erhalten wir den stöchiometrischen Koeffizienten  $v_0 = 1 \text{ kg} / M_{\text{Holz}}$ .

Weil wir von Durchflussmessgeräten meist den Volumen- und selten den Massenstrom erhalten, rechnen wir alle Gasmengen in ihr Normalvolumen um. Hierbei nehmen wir an, dass sich alle beteiligten Gase wie ideale Gase verhalten. Die Normalbedingungen sind  $0^\circ\text{C}$  und 1013 mbar, das Normalvolumen  $V_{\text{norm}}$  beträgt  $22.414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ . (Das Normvolumen von Wasser ist nur berechnet, da Wasser bei Normbedingungen flüssig ist).

$v_0$  Mol eines Gases entsprechen mit  $v_0 = \frac{1 \text{ kg}}{M_{\text{Holz}}}$  somit  $\frac{V_{\text{norm}}}{M_{\text{Holz}}} \text{ m}^3$  dieses Gases.

Die Grösse  $v_1$  ersetzen wir nach Formel (3.2).

Aus (3.11) erhalten wir die Stoffbilanz der Verbrennung von 1 kg trockenem Holz mit zusätzlichen  $u$  kg Wasser (entsprechend  $(1+u)$  kg Holz der Feuchtigkeit  $u$ ):

$$\begin{aligned}
 & 1 \text{ kg Holz} + u \text{ kg Wasser} + 4.76 \frac{V_{\text{norm}}}{M_{\text{Holz}}} \lambda A \text{ m}^3 \text{ Luft} \\
 & \rightarrow \frac{V_{\text{norm}}}{M_{\text{Holz}}} \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + \left( \frac{V_{\text{norm}} m}{M_{\text{Holz}}} \frac{1}{2} + \frac{V_{\text{norm}} u}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} \\
 & + \frac{V_{\text{norm}}}{M_{\text{Holz}}} (\lambda - 1) A \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 3.76 \frac{V_{\text{norm}}}{M_{\text{Holz}}} \lambda A \text{ m}^3 \text{ N}_2 \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \text{Molmasse Wasser} = 18 \text{ kg/kmol}$$

### 3 Verbrennungsrechnung

Aus dieser Formel (3.20) lassen sich nun einige nützliche Größen ablesen:

---Der **Luftbedarf** zur Verbrennung von  $(1+u)$  kg Holz beträgt  $4.76 \frac{V_{norm}}{M_{Holz}} A \text{ m}^3$ .

---Die beim Luftüberschuss  $\lambda$  entstehende **trockene Abgasmenge** beträgt:

$$\frac{V_{norm}}{M_{Holz}} (1 - A + 4.76 \lambda A) \text{ m}^3.$$

---Das **Wasserdampfvolumen** ist  $(\frac{V_{norm}}{M_{Holz}} \frac{m}{2} + \frac{V_{norm}}{M_{H_2O}} u) \text{ m}^3$ . (theoretisch, gerechnet auf Normbedingungen)

**Bemerkung:** Bei der Messung der Wasserdampfkonzentration in den Abgasen muss nach die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden. Eine relative Feuchte der Luft von 40 % bei 21 °C entspricht beispielsweise einem Wassergehalt  $\{H_2O_{Luft}\}$  von 1 Vol.-% = 0.01. Bei einer Luftzufuhr (trocken) von  $V_L$  erhöht sich das Wasserdampfvolumen somit um  $V_L \cdot \{H_2O_{Luft}\}$ . Für alle anderen Berechnungen wird für die Luftzufuhr  $V_L$  nur die trockene Luftmenge berücksichtigt.

### 3.5 Erzeugte Leistung

Bei der Verbrennung von 1 kg Holz der Feuchtigkeit  $u$  entsteht nach Formel (3.15) die folgende Energiemenge  $\Delta h$  (siehe auch Tabelle 2.2):

$$\Delta h = h_u = \frac{1}{1+u} (18500 - 2500 u) \text{ [kJ/kg}_{Holz}] \quad (3.21)$$

$h_u$  = (unterer) Heizwert

Kennen wir den Holzverbrauch  $\dot{m}_H$  [kg/h] einer Feuerung, können wir die erzeugte Leistung berechnen:

$$\dot{Q} = h_u \frac{\dot{m}_H}{3600} \text{ [kW]} \quad (3.22)$$

Den Holzverbrauch  $\dot{m}_H$  können wir mit einer Waage direkt bestimmen. Er lässt sich auch aus der Menge der zugeführten Luft  $\dot{V}_L$  sowie dem Luftüberschuss  $\lambda$  und dem Luftbedarf berechnen:

$$\dot{m}_H \text{ [kg/h]} = \frac{\dot{V}_L \text{ [m}^3\text{/h]}}{\lambda \text{ Luftbedarf [m}^3\text{/kg}_{Holz}]} \quad (3.23)$$

Die von einem Wärmetauscher gelieferte Leistung lässt sich direkt aus der Messung der Vor- und Rücklauf Temperatur sowie des Wasserdurchflusses berechnen. Nach diesem Prinzip arbeiten die in der Heizungstechnik üblichen Wärmemesser. Der Quotient der aus dem Holzverbrauch berechneten und der am Wärmetauscher gemessenen nutzbaren Leistung ergibt den Kesselwirkungsgrad  $\eta$  einer Feuerung.

### 3.6 Abgasverluste

Die "fühlbare Wärme" der Abgase wird nicht mehr genutzt, sie gehört deshalb zu den Abgasverlusten. Ebenfalls zu den Abgasverlusten gehört der Heizwert der unverbrannten Abgasbestandteile, wir nehmen hier aber eine vollständige Verbrennung an. Um die Volumenanteile der Abgaskomponenten pro  $(1+u)$  kg verbrannten feuchten Holzes nach Gleichung (3.20) verwenden zu können, rechnen wir die molare spezifische Wärme in die spezifische Wärme pro Volumeneinheit um:

$$c_{p,i,Vol} = \frac{c_{p,i}}{V_{norm}} \quad [\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ K}] \quad (3.24)$$

Unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit setzen wir für die spezifische Wärme folgende Werte ein:

$$\begin{aligned} c_{p,CO_2} &= 40 \text{ kJ}/\text{kmol K}, \quad c_{p,H_2O} = 34 \text{ kJ}/\text{kmol K}, \\ c_{p,O_2} &= 30 \text{ kJ}/\text{kmol K}, \quad c_{p,N_2} = 29 \text{ kJ}/\text{kmol K} \end{aligned} \quad (3.25)$$

(die weitaus grösste Temperaturabhängigkeit dieser Stoffe weist  $CO_2$  auf, dessen  $c_p$  bei  $0^\circ\text{C}$  bei  $37 \text{ kJ}/\text{kmol K}$  und bei  $200^\circ\text{C}$  bei  $44 \text{ kJ}/\text{kmol K}$  liegt. In unserem Bereich der Abgastemperaturen liegt der maximale Fehler des  $c_{p,CO_2}$  damit unter 10 %. In Anbetracht des  $CO_2$ -Anteils von maximal 21 % erreichen wir einen gesamten Fehler in der Berechnung der Abgasverluste von weniger als 3 %)

Nun können wir mit (3.20) und (3.24) die Abgasverluste  $Q_A$  pro kg verbrannten Holzes der Feuchtigkeit  $u$  berechnen:

$$\begin{aligned} Q_A = \frac{T_A - T_u}{1+u} & \left( \frac{c_{p,CO_2}}{M_{Holz}} + \frac{c_{p,H_2O}}{M_{Holz}} \frac{m}{2} + \frac{c_{p,H_2O}}{M_{H_2O}} u + \frac{c_{p,O_2}}{M_{Holz}} (\lambda - 1) A \right. \\ & \left. + 3.76 \frac{c_{p,N_2}}{M_{Holz}} \lambda A \right) \quad [\text{kJ}/\text{kg}_{Holz}] \end{aligned} \quad (3.26)$$

$T_A$  = Abgastemperatur

$T_u$  = Umgebungstemperatur

#### 3.7 Unvollständige Verbrennung, Schadstoffe

Bei der unvollständigen Verbrennung werden nicht mehr alle Kohlenstoff- und Wasserstoffatome aus dem Holz zu Kohlendioxid bzw. Wasser oxidiert. Stattdessen entsteht aus einem Teil des Kohlenstoffs nur Kohlenmonoxid. Aus vielen Bruchstücken der bei der Pyrolyse aufgebrochenen Moleküle des Holzes werden in der Flamme unzählige Kohlenwasserstoffverbindungen synthetisiert. Dabei können auch Verbindungen entstehen, welche im Holz nicht vorkommen. Wir finden darunter auch sehr giftige oder kanzerogene Stoffe wie Benzol, Formaldehyd und Dioxin. Der schwerflüchtige Teil dieser brennberen Stoffe bleibt in der Asche zurück; die flüchtigen werden mit den Abgasen emittiert [17][18]. Der Energiegewinn der Verbrennung wird kleiner, da die unverbrannten Stoffe noch einen gewissen Heizwert behalten.

Bei Messungen zeigt sich, dass schon bei geringfügig unvollständiger Verbrennung Kohlenmonoxid entsteht. Dieses Gas ist auf einfache Weise in den Abgasen zu messen und gilt deshalb als hervorragender Indikator für die Verbrennungsqualität. Sind die Kohlenmonoxidemissionen gering, so sind auch kaum Kohlenwasserstoffemissionen zu erwarten [9][14].

#### 3.8 Normierung der Emissionsmesswerte

Um Emissionen verschiedener Feuerungen sowie Werte von unterschiedlichen Betriebszuständen miteinander vergleichen zu können, müssen die Messwerte auf den gleichen Luftüberschuss bezogen werden. (Bloss verdünnte Abgase enthalten immer noch die gleiche Menge an Schadstoffen wie unverdünnte.) Die Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung [19] schreibt für Holzfeuerungen eine Bezugsgrösse für den Sauerstoffgehalt der Abgase von 11 Vol.-% vor, was einem Luftüberschuss von 2.1 entspricht. Die normierten Schadstoffkonzentrationen  $p_{\text{normiert}}$  erhält man also nach folgender Formel aus den gemessenen Konzentrationen  $p_{\text{gemessen}}$ :

$$p_{\text{normiert}} = p_{\text{gemessen}} \frac{\lambda_{\text{gemessen}}}{2.1} \quad [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (3.27)$$

Der Luftüberschuss  $\lambda_{\text{gemessen}}$  lässt sich nach der Formel (3.12b) aus der gemessenen Kohlendioxidkonzentration oder nach der Formel (3.13b) aus der gemessenen Sauerstoffkonzentration bestimmen.

### 3.9 Mittelwertbildung der Emissionsmesswerte

Oft möchte man statt dem komplexen zeitlichen Verlauf der Emissionen bloss deren Mittelwerte in bestimmten Betriebsphasen vergleichen. Die Grenzwerte in der Luftreinhalte-Verordnung beziehen sich auf Mittelwerte der Volumenkonzentrationen  $[\text{mg}/\text{m}^3]$  der Schadstoffe. Dies ist gleichbedeutend mit einer Angabe der Schadstoffmenge pro zugeführter Energiemenge, denn die Abgasmenge ist bei gegebenem Sauerstoffgehalt proportional zum Brennstoffverbrauch.

Zur Mittelwertbildung werden die während einer Messperiode  $T$  emittierten Schadstoffmengen  $[\text{mg}]$  durch das gleichzeitig freigesetzte Abgasvolumen  $V_{A,\text{tr}} [\text{m}^3]$  dividiert. Man kann sich vorstellen, dass man während der Messperiode die Abgase gesammelt hat und *danach* die Mittelwerte bestimmt und normiert.

Aus der zeitabhängigen, gemessenen Schadstoffkonzentration  $\rho(t)$  ergibt sich die über die Messperiode  $T$  gemittelte Konzentration  $\bar{\rho}$  (die Integrationsgrenzen über das Intervall  $T$  sind weggelassen):

$$\bar{\rho} = \frac{\int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) \rho(t) dt}{\int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) dt} \quad [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (3.28)$$

$\dot{V}_{A,\text{tr}}(t)$  = Volumenstrom der trockenen Abgase in Funktion der Zeit  $[\text{m}^3/\text{s}]$ .

Der mittlere Luftüberschuss  $\bar{\lambda}$ , berechnet aus dem Kohlendioxidvolumenanteil  $\{\text{CO}_2(t)\}$ , ergibt sich nach der vereinfachten Formel (3.12b) zu:

$$\bar{\lambda} = \frac{0.21 a}{\{\overline{\text{CO}_2}\}} = \frac{0.21 a \int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) dt}{\int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) \{\text{CO}_2(t)\} dt} \quad [-] \quad (3.29)$$

Aus (3.27), (3.28) und (3.29) folgt für die nach dem Kohlendioxidvolumenanteil auf 11 % Sauerstoff normierte mittlere Schadstoffkonzentration:

$$\bar{\rho}_{\text{normiert}} = \frac{a}{10} \frac{\int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) \rho(t) dt}{\int \dot{V}_{A,\text{tr}}(t) \{\text{CO}_2(t)\} dt} \quad [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (3.30)$$

Der mittlere Luftüberschuss  $\bar{\lambda}$ , berechnet aus dem Sauerstoffvolumenanteil  $\{\text{O}_2(t)\}$ , ergibt sich nach der vereinfachten Formel (3.13b) zu:

### 3 Verbrennungsrechnung

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= \frac{0.21}{0.21 - \{\overline{O_2}\}} = \frac{0.21}{0.21 - \frac{\int \dot{V}_{A,lr}(t) \{O_2(t)\} dt}{\int \dot{V}_{A,lr}(t) dt}} \quad [-] \\ &= \frac{0.21 \int \dot{V}_{A,lr}(t) dt}{0.21 \int \dot{V}_{A,lr}(t) dt - \int \dot{V}_{A,lr}(t) \{O_2(t)\} dt} \quad [-] \end{aligned} \quad (3.31)$$

Aus (3.27), (3.28) und (3.31) folgt für die auf 11 % Sauerstoff normierte mittlere Schadstoffkonzentration:

$$\bar{p}_{\text{normiert}} = \frac{1}{10} \frac{\int \dot{V}_{A,lr}(t) p(t) dt}{0.21 \int \dot{V}_{A,lr}(t) dt - \int \dot{V}_{A,lr}(t) \{O_2(t)\} dt} \quad [\text{mg/m}^3] \quad (3.32)$$

Bei konstantem Abgasvolumenstrom vereinfachen sich die Formeln (3.30) und (3.32) derart, dass sie einer Mittelwertbildung der gemessenen Gaskonzentrationen und *anschliessender* Normierung entsprechen. Falls der Holzabbrand konstant ist und nur der Luftüberschuss bei der Verbrennung schwankt, entsprechen die obigen Formeln einer Normierung jedes Messwertes und der *anschliessenden* Mittelwertbildung der Gaskonzentrationen. Für eine ausführliche Herleitung siehe [20].

Im allgemeinen Fall, wo der trockene Abgasvolumenstrom unbekannt ist, muss dieser für eine genaue Mittelwertbildung kontinuierlich gemessen werden.

Weil jedoch für Holz die Konstante A fast genau 1 beträgt, erhalten wir nach Formel (3.11) für den trockenen Abgasstrom  $\dot{V}_{A,lr}$ :

$$\dot{V}_{A,lr} = v_0 (1 + 4.76 A \lambda - A) = v_0 4.76 A \lambda = \dot{V}_L \quad [\text{mol}]$$

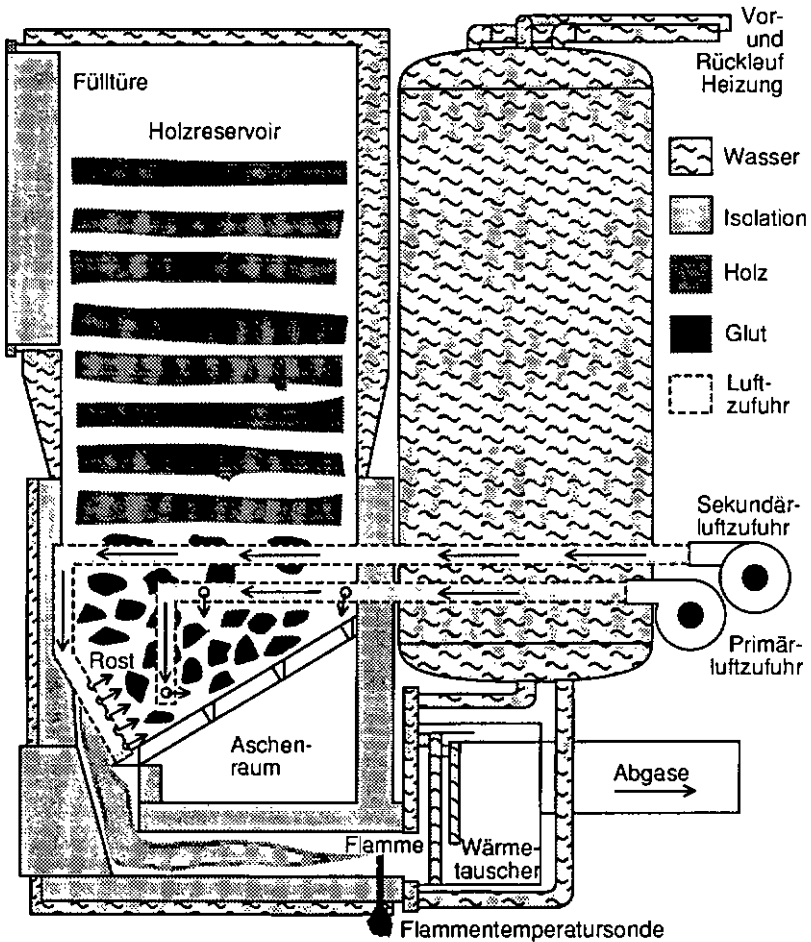
***Der trockene Abgasvolumenstrom ist bei annähernd vollständiger Verbrennung von Holz also fast genau gleich der trockenen Verbrennungsluftmenge.***

In unseren Versuchen haben wir die Verbrennungsluftmenge immer gemessen, deshalb führen wir die Mittelwertbildung mit Hilfe dieser Messwerte durch.

## 4 Versuchsfeuerung und Messanlage

### 4.1 Beschreibung der Feuerung

Alle Messungen wurden mit der in Figur 4.1 gezeigten Feuerung durchgeführt. Somit sind auch alle Resultate miteinander vergleichbar.



Figur 4.1 Schema der Versuchsfeuerung

## 4 Versuchsführung und Messanlage

Die Primärluftzufuhr erfolgt durch sechs Röhren in die trichterförmige Verengung unten im Füllschacht. In dieser gut isolierten, konischen Verengung liegt das Glutbett.

Ein kleiner, schräger Rost aus 3 feuerfesten Stahlrohren bildet die einzige Austrittsöffnung für die Gase im Füllschacht. Die Röhren haben gegen die Glut gerichtete Löcher, durch welche die Sekundärluft den entweichenden Gasen entgegen ein-geblasen wird.

In einem gut isolierten, engen Kanal vom Rost bis zum Wärmetauscher können die gemischten Gase ausbrennen. Am Ende des Ausbrandkanals wird die Flammtemperatur mit einem Thermoelement gemessen. Anschliessend geben die Verbrennungsgase den grössten Teil ihrer Energie im Wärmetauscher an das zirkulierende Wasser ab. Nach dem Wärmetauscher wird ein kleiner Teil der Abgase durch ein Sinterfilter für die Abgasanalyse entnommen.

Die Luftzufuhr erfolgt über getrennte Ventilatoren für die Primär- und Sekundärluft. Die Drehstromventilatoren werden durch Frequenzumformer gespiesen, welche eine einem analogen Steuersignal proportionale Frequenz in drei Phasen generieren. Die zugeführte Luftmenge wird mit zwei unabhängigen, geeichten Luftmessstrecken ständig gemessen.

### 4.1.1 Überlegungen zur Konstruktion

Die folgenden Bemerkungen sollen einige charakteristische Eigenschaften der Feuerung hervorheben:

- Der Holzvorrat im Füllschacht reicht für eine ununterbrochene Brenndauer bis zu 24 Stunden. (Konventionelle Feuerungen: 3–5 Stunden.) Weil das Holz im Füllschacht nur trocken soll, ohne bereits zu entgasen, wird dieser mit Wasser gekühlt. Damit wirkt er gleichzeitig auch als Wärmetauscher.
- Die konische Konstruktion des Glutbettes erlaubt einen Betrieb mit sehr kleinem Glutvolumen, wie es für eine kleine Heizleistung erforderlich ist.
- Dank dem Gegenstromprinzip der Sekundärluftbeimischung wird eine gute Durchmischung der Holzgase mit dem Luftsauerstoff erreicht. Die Sekundärluft wird unter der Ausmauerung des Glutbettes rund um die Feuerung durchgeführt und dabei bis zum Austritt im Rost auf einige hundert Grad vorgewärmt.
- Die Sekundärluft erzielt beim Kontakt mit den vor dem Rost liegenden Glutstücken auch einen geringen Primärlufteffekt, d. h. ein kleiner Teil der Sekundärluft tritt in Kontakt mit der Glut und fördert deren Entgasung. Dies muss beim Einstellen des Primär- zu Sekundärluft-Verhältnisses berücksichtigt werden.

- Die durch den kleinen Querschnitt des Ausbrandkanals bedingte hohe Strömungsgeschwindigkeit der Verbrennungsgase bewirkt eine starke Turbulenz und damit eine gute Durchmischung der brennbaren Gase mit dem Luft-sauerstoff.
- Die Ansteuerung der Ventilatoren ermöglicht eine präzise Einstellung der Drehzahl von fast Null bis 100 %.
- Die Messsignale der Luftmessstrecken werden nicht für eine Regelung der Luft-zufuhr zurückgeführt, weil die Versuchsbedingungen den realen Feuerungsbedingungen gleichen sollen. In der Praxis wird aus Kostengründen heute noch kaum eine Stückholzfeuerung mit einer Luftmessstrecke ausgerüstet werden.
- Die gesamte Feuerung steht unter einem leichten Überdruck. Dieser erleichtert das Auffinden von Undichtigkeiten, welche die Messungen verfälschen würden. Das Austreten von Rauch oder Schwelgasen ist leicht feststellbar, hingegen bliebe das Ansaugen von Falschlufte meist unbemerkt.
- Um die Abstrahlverluste in Grenzen zu halten, ist die Feuerung rundum mit 10 cm dicker Steinwolle isoliert. Leider mussten einige Löcher in die Isolation geschnitten werden, um die Messanschlüsse zugänglich zu machen.
- Die ganze Feuerung steht auf einer Waage, welche eine leichte Kontrolle der eingefüllten Holzmenge ermöglicht. Da das Gewicht ebenfalls laufend von der Datenaquisition aufgezeichnet wird, kann sogar der kontinuierliche Holzverbrauch ausgewertet werden.

### 4.2 Wasserkreislauf

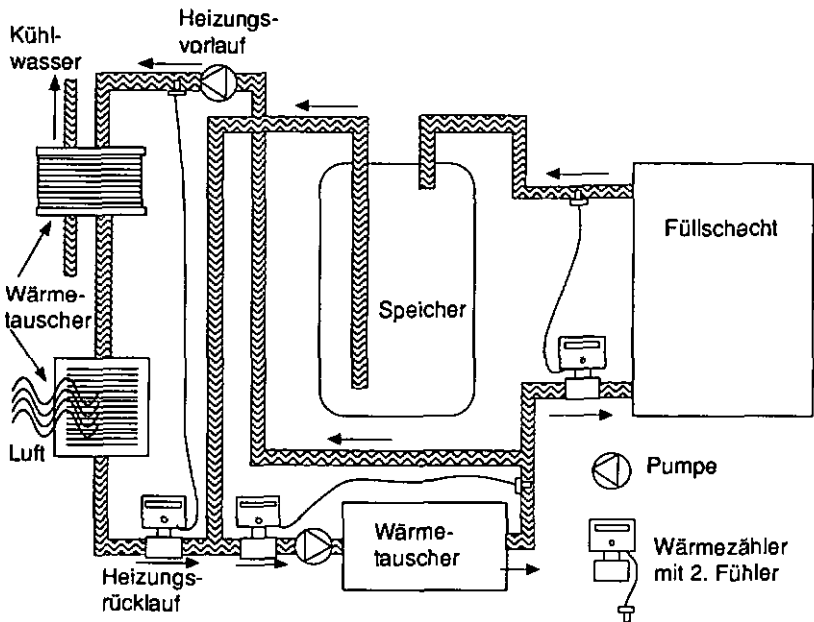
Im Wasserkreislauf sind Wärmetauscher, Füllschacht, Speicher und Heizung zusammengeschlossen. In folgenden beschreiben wir die Funktion der einzelnen Komponenten:

- Der kleine Zwischenspeicher dient als Puffer zwischen der Feuerung und dem Heizungskreis. Er dient ebenfalls zum Auffangen der Restwärme welche die Feuerung nach dem Abstellen noch liefert, falls diese nicht benötigt wird.
- Die Heizung wird in unserer Versuchsanlage durch zwei in Serie geschaltete Wärmetauscher simuliert. Diese Wärmetauscher führen die bei der Verbrennung entstehende Wärme an die Umwelt ab.

#### 4 Versuchsfeuerung und Messanlage

---Mit Ultraschall-Wärmezählern werden die vom Füllschacht und vom Wärmetauscher aufgenommenen Leistungen sowie die an die Heizung abgegebene Leistung gemessen. Rücklauf-Temperaturfühler (Pt-100) und Ultraschall-Durchflussmesser sind jeweils im Wärmezähler eingebaut, der Vorlauf-Temperaturfühler ist extern angeschlossen. Wir haben bewusst kein Heizungsregelventil zur Regelung der Vorlauftemperatur eingesetzt, weil dieses die Durchflussverhältnisse beeinflussen würde. Die in Figur 4.2 gezeigte Anordnung ermöglicht eine einfache Kontrolle der Durchflussmessungen, weil die Summe der Heizungs- und Füllschachtdurchflüsse den Wärmetauscherdurchfluss ergeben.

---Zwei Pumpen sorgen für die Wasserzirkulation im Kreislauf. Einige Minuten nach dem Abstellen der Feuerung kann die Pumpe im Wärmetauscherkreislauf ausgeschaltet werden. Dann kehrt sich die Fließrichtung im Speicher um, und dieser wird über die externen Wärmetauscher entladen (bzw. im Normalfall über des angeschlossene Heizungssystem).



Figur 4.2 Der Wasserkreislauf

### 4.3 Messgeräte

Zur Charakterisierung eines Abbrandzyklus und zur Überprüfung der Verbrennungsrechnung von Kapitel 3 in der Praxis möchten wir die Stoff- und Energiebilanzen der Feuerung bestimmen.

Die *Stoffbilanz* umfasst das feuchte Holz sowie die Verbrennungsluft als Edukte und die Abgase als Produkte.

Die *Energiebilanz* enthält die chemisch gebundene Energie des Holzes als Eingangsgrösse und die Nutzwärme sowie die Verluste als Ausgangsgrösse.

#### 4.3.1 Stoffbilanz

Der Holzverbrauch kann kontinuierlich gemessen werden, weil die gesamte Feuerung auf einer Waage steht. Die Holzzusammensetzung schwankt in der Natur nur wenig, deshalb genügen einzelne chemische Analysen von Holzproben um die Holzzusammensetzung zu bestimmen. Ohne grosse Einbusse an Genauigkeit können auch einfach Literaturwerte übernommen werden.

Die Verbrennungsluftmenge misst man am besten mit Volumenmessstrecken in der Luftzufuhr. Die Luftzusammensetzung ist aus der Literatur bekannt, die Lufttemperatur ist gleich der Umgebungstemperatur. Die Abgasmenge erhält man auch von einer Volumenmessstrecke, welche jedoch hohe Temperaturen und die Verschmutzung durch Abgase aushalten muss. Zur Umrechnung der Gasvolumina auf Normbedingungen muss auch die Abgastemperatur gemessen werden.

Weiterhin sollten die Anteile der Abgaskomponenten gemessen werden. Die Abgase setzen sich bei vollständiger Verbrennung zusammen aus Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf sowie mengenmässig vernachlässigbaren Spuren an Stickoxiden. Bei unvollständiger Verbrennung kommen noch Kohlenmonoxid und diverse Kohlenwasserstoffe dazu. Bei geringer Kohlenmonoxidkonzentration kann davon ausgegangen werden, dass die Kohlenwasserstoffkonzentration ebenfalls gering ist und somit für die Bilanz nicht ins Gewicht fällt; die Kohlenmonoxidkonzentration wird dann einfach zur Kontrolle der Vollständigkeit der Verbrennung gemessen. Ausserdem kann eine Gaskomponente aus der Differenz von hundert Prozent minus die prozentualen Anteile der andern Komponenten bestimmt werden.

***Eine vollständige Gasanalyse für annähernd vollständige Verbrennung umfasst somit beispielsweise die Gase  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  und  $CO$ . Hierbei dürften alle Konzentrationen in den trockenen Abgasen gemessen werden, ausser der  $H_2O$ -Konzentration.***

## 4 Versuchsfeuerung und Messanlage

### 4.3.2 Energiebilanz

Die Energiebilanz umfasst als Eingangsgrößen die Holzmenge und deren Heizwert. Dieser kann kalorimetrisch gemessen oder auch einfach der Literatur entnommen werden. Wichtig ist jedoch die Messung der Holzfeuchtigkeit von repräsentativen Proben möglichst unmittelbar vor dem Einfüllen des Holzes. Der Heizwert kann dann leicht nach Formel (3.21) aus der Holzfeuchtigkeit ausgerechnet werden.

Als Ausgangsgröße sollte zumindest die nutzbare Wärme gemessen werden. Zur Messung wo die Nutzwärme anfällt interessieren uns hier die Wärmeproduktion von Wärmetauscher und Füllschicht getrennt. Die Messung der ans Heizsystem abgegebenen Wärme erlaubt die Berechnung des Wirkungsgrades der gesamten Feuerung inklusive Speicher. Die Messung der Abgastemperatur erlaubt zusammen mit den Messgrößen der Abgasanalyse die Berechnung der Abgasverluste. Die Wärmeverluste der Feuerung durch Abstrahlung und Wärmeübertragung an die Umgebung können schlecht gemessen werden. Wenn die Nutzwärme im Wasserkreislauf und die Abgasverluste bekannt sind, können diese jedoch aus deren Differenz zur produzierten Wärme berechnet werden. Leider ist es dann nicht mehr möglich, die Energiebilanz zu überprüfen.

### 4.3.3 Zusätzliche Messungen

Eine weitere Größe zur Charakterisierung der Verbrennung ist die Flammentemperatur (oder Verbrennungstemperatur), d. h. die Temperatur der Abgase vor dem Eintritt in den Wärmetauscher. Diese Größe sagt etwas über die chemischen Reaktionsgeschwindigkeiten beim Ausbrand in der Flamme aus. Ausserdem erlaubt sie indirekt eine Bestimmung des Luftüberschusses nach Formel 3.18.

### 4.3.4 Beschreibung der einzelnen Messgeräte

Tabelle 4.1 zeigt eine Aufstellung aller Messgrößen sowie der entsprechenden Messgeräte mit deren Messunsicherheiten.

Messgröße	Messbereich	abs. Genauigkeit	Messprinzip	Fabrikat	Modell
CO <sub>2</sub>	20 %	±0.5 %	IR-Absorbtion	Leybold-Heraeus	Binos 1
CO	4 %	±0.1 %	IR-Absorbtion	Leybold-Heraeus	Binos 1
CO	1000 ppm	±25 ppm	IR-Absorbtion	Leybold-Heraeus	Binos 1
NO	1000 ppm	±25 ppm	IR-Absorbtion	Leybold-Heraeus	Binos 1
O <sub>2</sub>	30 %	±0.5 %	paramagnetisch	Asag	OX-1
H <sub>2</sub> O	100 %	0.5 %	Prall- Psychrometer	Ultrakust	Hydrophil Typ 4220
Flammentemp.	1370 °C	±10 °C	Thermoel. Typ K	divers	
Abgastemp.	600 °C	±5 °C	Thermoel. Typ J	divers	
Abgasgeschw.	1 mmWS	0.05 mmWS	Differenzdruck eines Staurohrs	Furness Control	FCO14
Primärluft	50 m <sup>3</sup> /h	±0.5 m <sup>3</sup> /h	Flügelrad- Anemometer	Schild- knecht	642a-m/3
Sekundärluft	50 m <sup>3</sup> /h	±0.5 m <sup>3</sup> /h	Flügelrad- Anemometer	Schild- knecht	642a-m/3
Wärmetauscher- leistung	>100 kW	±70 W, ±3 %	Ultraschall +Pt-100	Siemens	2WR2
Füllschacht- leistung	>100 kW	±30 W, ±3 %	Ultraschall +Pt-100	Siemens	2WR2
Heizungs- leistung	>100 kW	±50 W, ±3 %	Ultraschall +Pt-100	Siemens	2WR2
Ofengewicht	3000 kg	±0.5 kg	Dehnmess- streifen	Bizerba	3500/ED

Tabelle 4.1 Aufstellung der an der Datenaquisition angeschlossenen Messgeräte. Alle in der Tabelle angegebenen Genauigkeiten sind geschätzte Unsicherheiten des gesamten Messsystems inklusive Datenaquisition und eventuell Kalibrierung sowie der Drift während fünf Tagen. Die Genauigkeiten der Wärmezähler sind auf den effektiven Durchfluss bezogen.

#### 4 Versuchsfeuerung und Messanlage

Die **Infrerot-Absorptions Messgeräte** für CO<sub>2</sub>, CO und NO sowie der die paramagnetische Suszeptibilität messende Sauerstoffanalysator müssen vor den Messungen mit entsprechenden Eichgasen kalibriert werden. Die Messresultate erscheinen dann direkt in Volumenprozent bzw. in Molprozent. Wenn nach der Eichung keine grösseren Luftdruck- oder Temperaturschwankungen auftreten, brauchen die Messwerte nicht korrigiert zu werden. Die Schadstoffkonzentrationen von CO und NO sollten für Vergleiche mit der Luftreinhalte-Verordnung normiert, gemittelt und in mg/m<sup>3</sup> umgerechnet werden (Siehe Kapitel 3.8 und 3.9). Um den Messbereich des Kohlenmonoxids zu erweitern, setzen wir hierfür zwei Geräte mit Messbereichen von 1000 ppm und 4 % ein.

Das **Prall-Psychrometer** berechnet mit dem eingebauten Mikroprozessor verschiedene Grössen wie die absolute- und relative Feuchtigkeit, den Dampfdruck etc. Weil diese aber auf teuchte *Luft* bezogen werden, wurden bei den Messungen direkt die Rohdaten der Trocken- (TT) und Feuchtttemperatur (HT) sowie der Druck in der Messzelle (SP) aufgezeichnet. Nachträglich haben wir die Volumenkonzentration des Wasserdampfes, bezogen auf das trockene Gasvolumen, selbst berechnet. Die Psychrometerkonstante *c* wurde für jeden Messwert aus den andern gemessenen Gaskonzentrationen gerechnet. Es gilt:

$$\text{korrigierte Feuchtttemperatur } HT_K = HT - (100 - HT) \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Psychrometerkonstante *c*:

$$c = 10^{-6} \left( 8.118 \{CO_2\} + 6.342 \{O_2\} + 6.328 \{N_2\} \right) \left( 1 + 0.00115 HT_K \right)$$

wobei  $\{N_2\} = (1 - \{CO_2\} - \{O_2\})$

Die Werte in geschweiften Klammern bezeichnen die Molanteile.

Der Dampfdruck *VP* beträgt:

$$VP = c_1 e^{\frac{c_2 HT_K}{c_3 + HT_K} - c SP (TT - HT)} \text{ [mBar]}$$

und die Luftfeuchtigkeit in Vol % der trockenen Gase:

$$\{H_2O\} = \frac{VP}{SP - VP} 100 \% \text{ [%]}$$

wobei  $c_1 = 6.10780$ ;  $c_2 = 17.08085$ ;  $c_3 = 234.175$ ;

*Alle diese Formeln und Konstanten wurden der Bedienungsanleitung des Messgerätes entnommen. [21]*

Bemerkung: Das Psychrometer wurde über einen Quarzwattefilter und einen beheizten Schlauch direkt an den Kamin angeschlossen; selbstverständlich darf die Abgasfeuchte nicht vor der Messung auskondensiert werden. Das Messprinzip garantiert wegen dem ständig erneuerten Wasser bei der Messung der Feuchttemperatur eine grosse Unempfindlichkeit auf Verschmutzung.

Die intern im Messgerät berechnete Feuchtigkeit für Luft weicht nur wenig von unserer für Abgase berechneten Feuchtigkeit ab.

Die Thermaspannungen der Flammen- und Abgastemperatur-Thermoelamente wurden im Datenlogger gemessen. Die ebenfalls gemessene Temperatur der Anschlüsse der Ausgleichsleitungen im Datenlogger wurde in eine äquivalente Thermaspannung umgerechnet und dazuaddiert. Die Linearisierung dieser Spannung mit Polynomen 8.Grades (Typ K) bzw. 5.Grades (Typ J) ergibt dann die Temperatur der Messstelle in °C.

Zur Messung der Abgesgeschwindigkeit haben wir mit einem Manometer die Druckdifferenz an einem im Kamin plazierten Prantlschen Staurahr gemessen. Dieses Differenzdrucksignal  $\Delta p$  [mmWS] steht in folgendem Zusammenhang zur Strömungsgeschwindigkeit  $v$  [m/s]:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.80665 \Delta p}{\rho_A}} \quad [\text{m/s}]$$

1 mmWS = 1 mm Wassersäule = 9.80665 Pa

$\rho_A$  = Dichte des strömenden Gases in  $[\text{kg/m}^3]$

Aus der gemessenen Abgaszusammensetzung lässt sich dessen Dichte bei Normalbedingungen berechnen. Für Abgase erhalten wir die Dichte  $\rho_A$ :

$$\rho_A = \frac{1}{1 + \{\text{H}_2\text{O}\}} (\rho_{\text{CO}_2} \{\text{CO}_2\} + \rho_{\text{O}_2} \{\text{O}_2\} + \rho_{\text{N}_2} (1 - \{\text{CO}_2\} - \{\text{O}_2\}) + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \{\text{H}_2\text{O}\})$$

$\rho_x$  = Normdichte der Komponente x;

$\{x\}$  = Volumenanteil der Komponente x bezogen auf die trockene Abgasmenge;

Dabei ist zu beachten, dass die Komponenten  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$  Teil der trockenen Abgase sind, die Feuchtigkeit aber dazu addiert wird.

Mit der Zustandsgleichung für ideale Gase muss diese Abgasdichte nach van Normalbedingungen (0 °C; 1013 mbar) auf die im Kamin gemessene Abgastemperatur sowie den aktuellen Druck umgerechnet werden.

#### 4 Versuchsfeuerung und Messanlage

Zustandsgleichung nach Boyle-Mariotte:  $p V = \nu R T$  oder  $\frac{p V}{T} = \text{konstant}$

$\nu$  = Anzahl Mole

$R$  = molare Gaskonstante

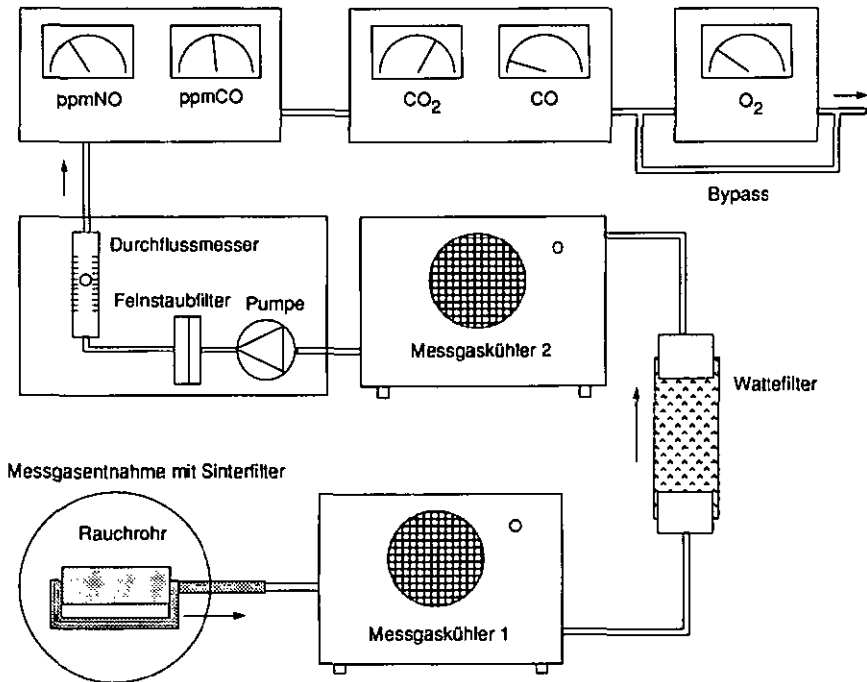
Mit unserem Prantlschen Staurohr messen wir die maximale Abgasgeschwindigkeit in der Mitte der Rohres nach einer Beruhigungsstrecke von über 10 Rohrdurchmessern. Bei unseren Feuerungsbedingungen haben wir Strömungsverhältnisse in der Messstrecke mit  $Re$ -Zahlen um 5000, d. h. wir können eine gleichmäßig turbulente Strömung im technisch glatten Rohr annehmen. Aus der technischen Strömungslehre ist bekannt, dass in diesem Fall die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $(0,81 \pm 0,01)$  mal der maximalen Geschwindigkeit ist [22]. Aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit erhalten wir durch Multiplikation mit dem Rohrquerschnitt nun direkt den Durchfluss. Die Berechnung des Durchflusses aus der Druckdifferenz wurde für jeden Messwert einzeln vorgenommen.

Kleine Flügelrad-Anemometer dienen uns zur Messung der Primär- und Sekundärluftzufuhr. Dazu haben wir eine Messstrecke mit Strömungsgleichrichter, einer Beruhigungsstrecke von zwanzig Rohrdurchmessern und einer Auslaufstrecke mit fünf Rohrdurchmessern gebaut. Die ganze Messstrecke wurde im Bundesamt für Messwesen direkt auf den Volumendurchfluss geeicht. Als Messergebnis erhalten wir nach einer elektrischen Signalaufbereitung eine zur Umdrehungszahl der Anemometer äquivalente Frequenz. Messfehler entstehen damit praktisch nur noch durch erhöhte Reibung, wenn die Lager der Windrädchen abgenutzt oder von rückströmenden Abgasen verschmutzt sind. Der Volumendurchfluss muss nach der Messung nur noch auf Normalbedingungen umgerechnet werden; die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Flügelrad-Anemometern ist unabhängig von der Gasdichte. Die genaue Verbrennungsluftmenge erhalten wir dann nach Abzug der absoluten Luftleuchte von etwa 1 %.

Die Leistungen wurden mit Ultraschall-Wärmezählern gemessen. Diese berechnen aus Durchfluss, Vor- und Rücklauftemperatur die Wärmeleistung mit einem eingebauten Mikroprozessor. Es müssen somit keine externen Korrekturen mehr durchgeführt werden. Alle Messdaten der Wärmezähler können über eine serielle current-loop Schnittstelle vom Computer abgefragt werden. Ebenso sendet die Waage das fertig aufbereitete Resultat der Wägung über eine gleichartige Schnittstelle an den Computer.

#### 4.4 Abgasaufbereitung

Die durch einen Sinterfilter angesaugten Abgase werden durch einen ersten Abgaskühler geleitet. Anschliessend durchlaufen sie einen Quarzwattetfilter, dann einen weiteren Kühler. Die Abgaskühler sind im Innern auf  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  thermostatisiert. Dadurch kondensiert die Feuchtigkeit darin aus. Bei  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 1013 mbar enthält gesättigte Luft höchstens noch 5 g Wasser pro kg Luft oder 0.8 Vol.-%. Im Kontroll-einschub von Leybold-Heraeus befördert eine Pumpe die Gase dann durch einen Feinstaubfilter und einen Durchflussmesser zu den verschiedenen Analysegeräten. Der Gasdurchfluss wird von Hand auf etwa 30 l/h eingestellt.



Figur 4.3 Aufbau der Gasanalyse

Die Trocknung und Filterung der Abgase ist dabei sehr wichtig, da die Abgase Wasser und bei schlechter Verbrennung Teere enthalten. Diese Stoffe können sich sonst in den Messküvetten der IR-Absorptionsmessgeräte niederschlagen und die

## 4 Versuchsteuerung und Messanlage

Messergebnisse verfälschen. Zudem werden die Messresultate auf die *trockene* Rauchgasmenge bezogen. Der maximale durch die Restfeuchte von 0.8 Vol.-% erzeugte Fehler beträgt somit auch nur 0.8 % vom Messergebnis.

Weil das Sauerstoff-Messgerät eine interne Messgaspumpe hat, wurde zum Druckausgleich ein Bypass parallel dazu gelegt. Selbstverständlich darf diese Pumpe nur eine geringere Gasmenge fördern als die im Kontrolleinschub.

### 4.5 Datenaquisition

Der Kopf der Datenaquisition ist ein Personal-Computer mit diversen Einsteckkarten. Als Schnittstelle dient zum einen eine Karte zum Anschluss eines Datenloggers über den HP-IL Bus, zum andern eine Karte mit vier seriellen current-Loop Schnittstellen zum Anschluss der drei Wärmezähler sowie der Waage. Die dritte Karte besitzt zwei Analogausgänge mit 0-10 V Ausgangsspannung zur Ansteuerung der Frequenzrichter für die Ventilatoren der Luftzufuhr. In Figur 4.4 ist das Anschlussschema dargestellt.

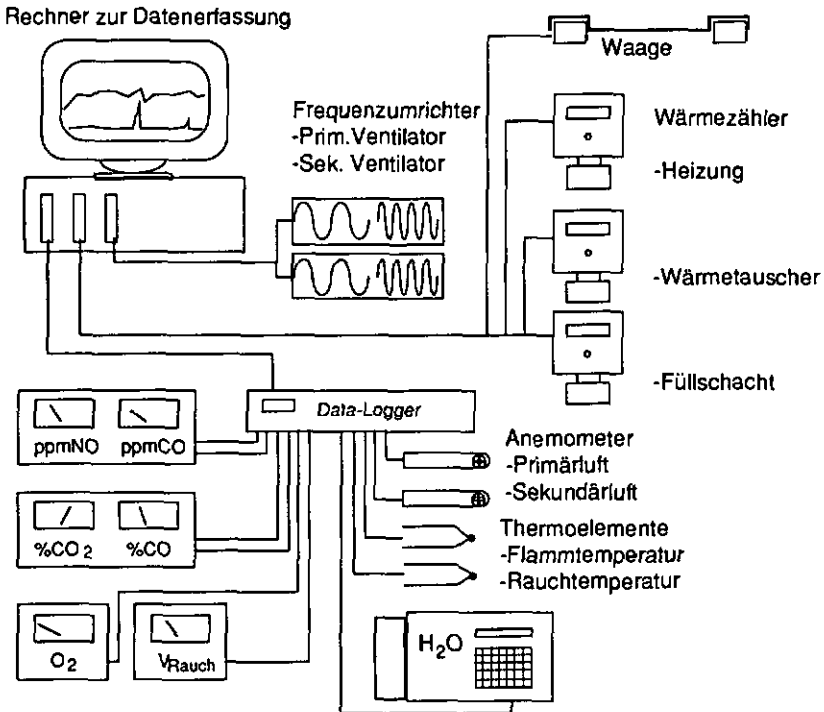
An den analogen Eingängen des Datenloggers sind angeschlossen:

- Die Messgeräte der Gasanalyse, für CO<sub>2</sub>, NO, O<sub>2</sub> sowie zwei Messbereiche CO.
- Die vier Analogausgänge des Psychrometers, konfiguriert für die Feucht- und Trockentemperatur, den Druck in der Messzelle und die absolute Feuchte.
- Das Differenzdruckmanometer zur Messung der Abgasgeschwindigkeit.
- Sowie die Thermoelemente zur Messung der Flammentemperatur und der Abgastemperatur.

Ausserdem sind zur Frequenzmessung angeschlossen:

- Die Flügelradanemometer der Luftversorgung.

#### 4 Versuchsfeuerung und Messanlage



Figur 4.4 Schema der Datenaquisition

Der Datenlogger HP 3421A misst elektrische Spannungen, Widerstände, Ströme, Frequenzen sowie die Referenztemperatur an den Anschlussklemmen mit hoher Auflösung und hervorragender Störungsunterdrückung. Nachteilig bei der Messung von vielen Kanälen wirkt sich die niedrigere Messgeschwindigkeit aus.

Die Wärmezähler senden auf Anfrage einen Datensatz. Dieser enthält in verschlüsselter Form alle Messgrößen wie die Vor- und Rücklauftemperatur und den Durchfluss. Ausserdem sind nebst vielen für uns irrelevanten Daten der berechnete Wärmefluss enthalten. Die ganze Abfrage dauert bis zu sieben Sekunden; deshalb werden alle drei Wärmezähler gleichzeitig abgefragt.

Die Waage sendet ununterbrochen das Gewicht; bei der Abfrage werden die Daten solange ausgewartet, bis ein vollständiger Datensatz angekommen ist.

Die Messung aller Größen dauert über 20 Sekunden; die minimale Abtastzeit ist damit auf ca. 30 Sekunden beschränkt. Um die Datenmenge nicht allzusehr anwachsen zu lassen, wurde meist mit einer Minute Abtastzeit gearbeitet.

### 4.6 Messprogramm

Weil mit kommerziell erhältlichen Datenaquisitionsprogrammen der Anschluss spezieller Messgeräte, wie z. B. Wärmehählern, nicht möglich ist, wurde das Messprogramm selbst geschrieben. Dazu wurde die Programmiersprache Modula-2 gewählt. Modula-Compiler garantieren eine grosse Sicherheit vor Flüchtigkeitsfehlern beim Programmieren, weil diese bei der strengen Syntaxprüfung meist entdeckt werden. Das Computerprogramm enthält folgende Funktionen:

- Mit einem frei wählbaren Abtastzyklus werden alle gewünschten Messungen durchgeführt. Die Messwerte werden entsprechend ihrer Art aufbereitet (z. B. linearisiert) und die Überschreitung von Grenzwerten überprüft. Alle Messwerte werden dann zusammen mit Datum und Uhrzeit nach jedem Zyklus auf der Harddisk des Computers abgespeichert. Nach Wunsch werden alle Grenzwertüberschreitungen und Fehlermeldungen protokolliert.
- Alle aktuellen Messwerte werden numerisch am Bildschirm angezeigt. Die 60 letzten Messwerte von acht zu jeder Zeit wählbaren Kanälen werden graphisch in zwei Fenstern angezeigt. Wenn gewünscht, werden die acht gewählten Kanäle auch auf einem Nadeldrucker graphisch aufgezeichnet.
- Zur Ansteuerung der Frequenzrichter für die Luftzufuhr-Ventilatoren sind folgende Funktionen für die Primär- und Sekundärluft frei wählbar:
  - teste Einstellung der Luftzufuhr.
  - Rampen- bzw. Dreiecksfunktion mit wählbarem oberem und unterem Grenzwert sowie wählbarer Steilheit.
  - Schritte bzw. Rechteckfunktion mit wählbarem oberem und unterem Grenzwert sowie Impuls- und Pausenverhältnis.
  - Proportional-Integral Reglerfunktion mit wählbaren Parametern.

Vor der Durchführung einer Messung müssen die gewünschten Messkanäle, Grenzwerte sowie allfälligen Korrekturfaktoren und Spezifikationen in einem definierten Format in ein Textfile geschrieben werden. Dieses wird dann vom Programm gelesen und interpretiert. Wenn immer ähnliche Messungen durchgeführt werden, müssen diese Daten selbstverständlich nur einmal eingegeben werden.

Das Programm ermöglicht eine komfortable und zuverlässige Durchführung aller gewünschten Messungen.

#### 4.7 Messung der Holzfeuchtigkeit

Alle angegebenen Holzfeuchtigkeiten wurden nach folgendem Verfahren bestimmt: Aus mindestens drei willkürlich ausgewählten Scheitern haben wir je zwei Scheiben von ca. 1 cm Dicke als Proben herausgesägt. Die Proben wurden sofort mit einer Analysenwaage Mettler AE 160 gewogen und deren Feuchtgewicht  $m_f$  notiert.

Anschliessend wurden die Proben in einem thermostatisierten Backofen bei  $103 \pm 2$  °C während 24 Stunden getrocknet [23]. Unmittelbar danach wurden die Proben wieder gewogen um das Trockengewicht  $m_{tr}$  zu bestimmen. Die Holzfeuchtigkeit  $u$  einer Probe ergibt sich dann nach folgender Formel:

$$u = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}}$$

Als mittlere Holzfeuchtigkeit wurde der arithmetische Mittelwert aller Proben genommen. Die Feuchtigkeiten der Proben wichen normalerweise um weniger als 1 % voneinander ab.

##### Bemerkungen:

Beim Trocknen stellten wir fest, dass das Trockengewicht bereits nach einigen Stunden erreicht war und sich dann praktisch nicht mehr veränderte. Ebenfalls hängt das Messresultat kaum von der Trocknungstemperatur ab. Letzteres lässt sich auch mit der Thermographimetriekurve in Figur 2.1 erklären. Zwischen 100 °C und 250 °C bleibt das Probengewicht bei der Thermographimetrie fast konstant.

Die Messung der Holzfeuchtigkeit ist also unkritisch, viel wichtiger scheint uns eine repräsentative Probennahme. Ein ganzes Holzseith zu trocknen dauert lange und setzt einen sehr grossen Ofen voraus. Eine Scheibe aus einem Holzseith enthält immer noch einen repräsentativen Querschnitt aller Bereiche von der Rinde bis zum Kern. Eine weitere Zerkleinerung ist nicht notwendig, wenn der zur Verfügung stehende Trocknungsafen gross genug ist. Weiter ist darauf zu achten, dass beim Sägen nicht zuviel Wärme entsteht, welche die Probe austrocknen könnte und dass das Feuchtgewicht sofort nach dem Sägen gemessen wird.

## 5 Testmessungen

---

### 5.1 Zweck unseres Referenzversuchs

Wir beschreiben hier den Abbrand einer Holzfüllung, ohne Anfeuer- und Ausbrandphase. Mit den Resultaten dieses Referenzversuchs können wir sowohl unsere Messanlage, wie sie im Kapitel 4 vorgestellt wurde, wie auch die Verbrennungsrechnung aus Kapitel 3 überprüfen.

#### 5.1.1 Allgemeine Versuchsbedingungen

Um reproduzierbare Resultate zu erhalten, wurden alle hier dokumentierten Versuche mit einer warmen Feuerung durchgeführt. Das heisst, das bei Versuchsbeginn der Speicher, das zirkulierende Wasser sowie die Ausmauerung des Glutbettes bereits auf einer durchschnittlichen Betriebstemperatur waren.

Im Normalfall wurde alle 12 bis 24 Stunden Holz nachgefüllt, je nach Leistung der Feuerung. Dazu wurde die Luftzufuhr nur kurz abgestellt. Direkt nach dem Auffüllen liegt also frisches Holz über der bereits bestehenden Glut. Im Verlauf eines Versuches wird dann das ganze eingefüllte Holz getrocknet und soweit verbrannt, bis wieder ein Glutbett gleicher Grösse wie zu Beginn vorliegt.

Mit zunehmender Versuchsdauer wird das Holz in der Feuerung trockener und teilweise bereits entgast. Die Zusammensetzung des Holzes, welches gerade verbrennt, verändert sich also während eines Versuches. So liegt am Schluss nur noch völlig trockenes Holz mit einem höheren Kohlenstoffanteil als zu Beginn in der Feuerung. Dieser Brennstoff hat einen höheren Heizwert sowie einen höheren Luftbedarf im Vergleich zu frischem Holz [24][25]. Die zeitlichen Verläufe der Messwerte in den Figuren 5.8 und 5.9 zeigen diesen Effekt sehr deutlich.

***Weil sich die Brennstoffzusammensetzung über einen ganzen Abbrandzyklus ändert und nur global aus der Elementaranalyse von Holzproben bekannt ist, kann die Verbrennungsrechnung deshalb nur auf Mittelwerte über die Verbrennung von ganzen Chärgen bezogen werden. Die Verbrennung einer Charge geht von einem bestehenden Glutbett aus. Darauf wird Holz eingefüllt und abgebrannt bis die Feuerung wieder dasselbe Gewicht aufweist wie vor dem Einfüllen.***

Auch bei diesem Vorgehen kann noch nicht garantiert werden, dass das Glutbett vor und nach dem Versuch den selben Entgasungszustand aufweist. Die Messresultate werden bei dieser Art der Versuchsdurchführung jedoch so reproduzierbar wie möglich.

## 5 Testmessungen

### 5.2 Mittelwerte über die Verbrennung einer ganzen Charge

In Tabelle 5.1 sind alle über den ganzen Referenzversuch gemittelten Messwerte angegeben. Damit lassen sich sowohl die Verbrennungsrechnung nachvollziehen als auch eine komplette Bilanz der Stoffe und der Energie bei der Holzverbrennung erstellen.

Messgrösse	Messwerte	berechn. Resultat	Symbol
CO <sub>2</sub> -Konzentration	14.56 %	14.56 %	{CO <sub>2</sub> }
CO-Konzentration *	1079 ppm	931 mg/m <sup>3</sup>	{CO}
NO-Konzentration *	94 ppm	90 mg/m <sup>3</sup>	{NO}
O <sub>2</sub> -Konzentration	6.46 %	6.46 %	{O <sub>2</sub> }
H <sub>2</sub> O-Gehalt *	(divers)	15.27 % trocken	{H <sub>2</sub> O}
Abgasvolumenstrom *	0.127 mmWS	25.2 m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{A,1}$
Primärluft trocken *	12.37 m <sup>3</sup> /h	11.06 m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_P$
Sekundärluft trocken *	13.44 m <sup>3</sup> /h	12.01 m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_S$
Flammentemperatur	896.5 °C	896.5 °C	T <sub>F</sub>
Abgastemperatur	133.5 °C	133.5 °C	T <sub>A</sub>
Holzverbrauch	4.3636 kg/h	4.3636 kg/h	$\dot{m}_H$
Heizungsleistung	12.02 kW	12.02 kW	$\dot{Q}_{HS}$
Wärmetauscherleistung	8.63 kW	8.63 kW	$\dot{Q}_{WT}$
Füllschachtleistung	4.86 kW	4.86 kW	$\dot{Q}_{FS}$
Restwärme Füllschacht *	3.48 kWh	3.28 kWh	Q <sub>FS</sub>
Restwärme Speicher *	8.00 kWh	8.00 kWh	Q <sub>SP</sub>
Holzfeuchte	0.20	0.20	u
Heizwert trocken	18200 kJ/kg	18200 kJ/kg	h <sub>u</sub>
Molmasse Holz	24.63 kg/kmol	24.63 kg/kmol	M <sub>Holz</sub>
Stöchiometrischer Koeff.	1.512	1.512	m
Holzkonstante	1.031	1.031	A
Luftfeuchte (geschätzt)	1 Vol %	1 Vol %	{H <sub>2</sub> O <sub>Luft</sub> }
Luftdruck	985 mbar	985 mbar	Pa
Umgebungstemperatur	21 °C	21 °C	T <sub>u</sub>

Tabelle 5.1 Mittelwerte über die Verbrennung einer Charge Holz. Zu den mit einem Stern markierten Grössen wurden die Resultate nach den folgenden Bemerkungen sowie nach den Angaben in Kapitel 4.3.4 berechnet.

**Bemerkungen zu Tabelle 5.1:**

- Die CO- und NO-Emissionen sind normiert auf 11 % Sauerstoff. Die Mittelwerte wurden nach Formel 3.32 berechnet. Für die trockene Abgasmenge haben wir die Verbrennungsluftmenge eingesetzt.
- Die NO-Konzentration muss zum Vergleich mit den Angaben der Luftreinhalteverordnung in NO<sub>2</sub> umgerechnet werden. Das spezifische Gewicht von NO<sub>2</sub> ist  $\frac{46 \text{ g/mol}}{30 \text{ g/mol}}$  mal grösser als das von NO. Damit entsprechen 94 mg/m<sup>3</sup> NO 144 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>.
- Der Wasserdampfgehalt der Rauchgase wurde für jede Messung aus der Trocken- und der Feuchttemperatur und dem Druck in der Messzelle des Psychrometers berechnet. Erst am Schluss wurden diese Werte gemittelt (siehe Kapitel 4.3.4).
- Der Abgasvolumenstrom wurde aus dem Differenzdruck an einem Prantlischen Staurohr im Kamin für jeden Messwert einzeln berechnet. Diese Werte wurden anschliessend gemittelt (siehe Kapitel 4.3.4).
- Die Luftzufuhr wurde auf Normbedingungen umgerechnet und davon der Wassergehalt subtrahiert.
- Die Restwärmemenge wird aus der Temperaturerhöhung von Speicher und Füllschacht während dem Versuch und deren Wasserinhalt berechnet.

**5.3 Überprüfung der Stoffbilanz**

Wir haben jetzt alle Resultate, um die Stoffbilanz der Verbrennungsrechnung nachvollziehen und überprüfen zu können. In 825 Minuten wurden 60 kg Buchenholz verbrannt. Proben dieses Holzes wurden vorgängig von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) analysiert. Bei Vernachlässigung des Aschenanteils von etwa 0.3 % (nach [8]) ergab die Elementaranalyse folgende Zusammensetzung:

Kohlenstoff:	48.72 g/100g (des wasserfreien Holzes)
Wasserstoff:	6.14 g/100g
Sauerstoff:	45.14 g/100g.

## 5 Testmessungen

Der Heizwert des trockenen Holzes war 18200 kJ/kg. Die Holzfeuchtigkeit  $u$  haben wir nach der in Kapitel 4.7 beschriebenen Methode gemessen, sie betrug 20.0 %.

### 5.3.1 Luftüberschuss

Weil die mittlere, nicht normierte CO-Emission des Referenzversuchs nur 1079 ppm beträgt, können wir dieses Gas in der Stoffbilanz vernachlässigen. Aus den Mittelwerten in Tabelle 5.1 lässt sich der globale Luftüberschuss  $\lambda_G$  nach der Definitionsgleichung (3.9) berechnen.

effektiv zugeführte Luftmenge pro Stunde:  $\dot{V}_P + \dot{V}_S$

Luftbedarf für 1 kg feuchtes oder  $\frac{1}{1+u}$  kg trockenes Holz nach Gleichung (3.20):

$$\text{Luftbedarf} = \frac{1}{1+u} 4.463 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{Holz}}$$

$$\text{Luftüberschuss } \lambda_G = \frac{\text{Luftzufuhr}}{\text{Luftbedarf}} = \frac{(1+u) (\dot{V}_P + \dot{V}_S)}{\dot{m}_H 4.463 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1.42$$

Wir können den Luftüberschuss auch aus den gemessenen Gaskonzentrationen nach den Formeln (3.12b) und (3.13b) berechnen. Aus der CO<sub>2</sub>-Konzentration erhalten wir:

$$\lambda_{\text{CO}_2} = \frac{20.37}{14.56} = 1.40$$

und aus der O<sub>2</sub>-Konzentration:

$$\lambda_{\text{O}_2} = \frac{21}{21-6.46} = 1.44$$

Die Abweichungen zwischen diesen Werten entstehen zum einen Teil aus den Mess- und Kalibrierfehlern. Sie werden aber auch durch den Zustand des Glutbettes vor und nach dem Abbrand beeinflusst. Allein die Bestimmung des Gewichts der Glut vor und nach einem Versuch garantiert noch nicht die gleiche Zusammensetzung derselben. Trotzdem sind die Unterschiede zwischen den Resultaten gering.

### 5.3.2 Gaskonzentrationen

Aus der Holzzusammensetzung, der verbrannten Holzmenge sowie der Menge der zugeführten Luft können wir die Abgaszusammensetzung herleiten. Die derart berechneten Volumenkonzentrationen der Abgasbestandteile können anschliessend mit den gemessenen Werten verglichen werden.

Aus  $(1+u)$  kg feuchtem Holz entstehen nach Gleichung (3.20)  $6.31 \text{ m}^3$  trockene Abgase bestehend aus:

$$0.91 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + 0.937 (\lambda - 1) \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 3.53 \lambda \text{ m}^3 \text{ N}_2$$

sowie

$$(0.688 + 1.245 u + 0.045 \lambda) \text{ m}^3 \text{ Wasserdampf.}$$

Beim Wasserdampf ist hier die Feuchtigkeit in der Verbrennungsluft von geschätzten 1 Vol% mitberücksichtigt. Bei allen andern Messgrössen spielt die Luftfeuchtigkeit keine Rolle, da die andern Gase trocken gemessen werden und die Verbrennungsluftmenge um die Luftfeuchtigkeit bereits korrigiert wurde.

Für den Luftüberschuss müssen wir den aus der Holzmenge und Luftzufuhr berechneten Wert von 1.42 einsetzen, weil wir hier von den Edukten ausgehen. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der trockenen Abgase beträgt infolgedessen:

$$\{\text{CO}_2\} = \frac{0.91}{6.31} = 0.1442 = 14.42 \% \text{ (gemessener Mittelwert: } 14.56 \% \text{)}$$

Analog gilt für die  $\text{O}_2$ -Konzentration:

$$\{\text{O}_2\} = \frac{0.394}{6.31} = 0.0624 = 6.24 \% \text{ (gemessener Mittelwert: } 6.46 \% \text{)}$$

Für die  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentration bezogen auf die trockenen Abgase ergibt sich:

$$\{\text{H}_2\text{O}\} = \frac{0.688 + 0.249 + 0.064}{6.31} = 0.1586 = 15.86 \%$$

(gemessener Mittelwert: 15.27 %)

Die Verbrennungsrechnung von Kapitel 3 konnte mit diesem hier dokumentierten Versuch innerhalb der Messgrenzen bestätigt werden. Ebenfalls konnten wir zeigen, dass die Gasanalyse keine gravierenden Fehler, wie Undichtigkeiten der Messgasschläuche oder ähnliches, aufweist.

## 5 Testmessungen

### 5.3.3 Abgasvolumenstrom

Die feuchte Abgasmenge pro  $(1+u)$  kg verbranntem Holz lässt sich aus der Luftzufuhr nach Gleichung (3.20) berechneten:

$$\begin{aligned} V_{A,f} = & \frac{22.414}{24.63} \left( 1 - A + 4.76 \lambda A + \frac{m}{2} \right) + 1.245 u \\ & + \frac{106.73 \lambda A}{24.63} \{H_2O_{Luft}\} \quad [m^3 / (1+u) \text{ kg}_{\text{Holz}}] \end{aligned}$$

Pro Stunde beträgt der Abgasvolumenstrom denn:

$$\dot{V}_{A,f} = \frac{\dot{m}_H V_A}{1+u} = 26.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der gemessene Mittelwert von 25.2 m<sup>3</sup>/h stimmt innerhalb der Messgenauigkeit des Differenzdruck-Manometers von 5 % mit dem oben berechneten Wert von 26.6 m<sup>3</sup>/h überein. Im Rahmen der Messgenauigkeit ist unsere Feuerung also dicht. Der zeitliche Verlauf des Abgasvolumenstroms geht aus Figur 5.5 hervor.

## 5.4 Überprüfung der Energiebilanz

Beim hier beschriebenen Referenzversuch wurden auch alle für eine vollständige Energiebilanz nötigen Messwerte aufgezeichnet. Weil von den Verlusten der Feuerung nur die Abgasverluste messbar sind, müssen wir alle andern Verluste aus der Differenz der bekannten Messwerte zur erzeugten Energie berechnen. Deshalb bleibt leider keine Redundanz mehr zur Verifizierung der Messungen. Aus der Energiebilanz kann der Wirkungsgrad als wichtiges Gütekriterium der Feuerung abgeleitet werden. Ebenfalls erhalten wir Hinweise für die Verbesserung der Feuerungskonstruktion, wenn sichtbar wird, wo grosse Verluste entstehen. Aus der Menge und dem Heizwert  $h_u$  des verbrannten Holzes ergibt sich die erzeugte Energiemenge, welche wir am Wärmetauscher, Füllschacht und in den Speicher-, Abgas- sowie den Abstrahlverlusten wiedertreffen. Nach Formel (3.22) gilt:

$$\text{Erzeugte Leistung} = h_u \frac{\dot{m}_H}{3600} = 17.88 \text{ kW}$$

$h_u$  berechnen wir nach Formel (3.21)

Aus der im Heizkreislauf gemessene Leistung  $\dot{Q}_{HS}$  und der Restwärme im Füllschacht und im Speicher  $Q_{FS} + Q_{SP}$  erhalten wir:

$$\text{Nutzbare Leistung wasserseitig} = \dot{Q}_{HS} + \frac{Q_{FS}}{T} + \frac{Q_{SP}}{T} = 12.85 \text{ kW}$$

T bezeichnet hier die Messdauer von 825 min = 13.75 h.

Der Kesselwirkungsgrad der Feuerung wird also:

$$\frac{12.85}{17.88} 100 \% = 72.0 \%$$

$$\text{Die Speicherverluste betragen: } \dot{Q}_{WT} + \dot{Q}_{FS} - \dot{Q}_{HS} - \frac{Q_{SP}}{T} = 0.89 \text{ kW}$$

Zur Berechnung der Enthalpie der Abgase modifizieren wir die Gleichung (3.26) geringfügig, weil uns alle benötigten Volumenkonzentrationen und sogar das Abgasvolumen zur Verfügung stehen. Mit (3.24) und (3.25) erhalten wir:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_A &= \frac{(T_A - T_U) \dot{V}_{A,l}}{1 + \{H_2O\}} \left( \{CO_2\} \frac{c_{p,CO_2}}{v_{norm}} + \{H_2O\} \frac{c_{p,H_2O}}{v_{norm}} \right. \\ &\quad \left. + \{O_2\} \frac{c_{p,O_2}}{v_{norm}} + \{N_2\} \frac{c_{p,N_2}}{v_{norm}} \right) \Delta T \quad [\text{kJ/h}] \\ &= 4176 \text{ kJ/h} = 1.16 \text{ kW} \end{aligned}$$

Die Division durch  $(1 + \{H_2O\})$  ist erforderlich, weil sich alle Gaskonzentrationen auf die trockene Abgasmenge beziehen. Der zeitliche Verlauf der Abgasverluste geht aus Figur 5.9 hervor.

Die Verluste durch unverbrannte Stoffe in den Abgasen sind gering. Die Reaktionsenthalpie der Oxidation von Kohlenmonoxid beträgt 284 kJ/mol oder 10.1 kJ/g. Die trockene Abgasmenge für  $\lambda = 2.1$  ist fast genau gleich der Verbrennungsluftmenge mal 2.1/l. Wir haben also  $23.07 \cdot 2.1/1.42 \text{ m}^3/\text{h} = 34.1 \text{ m}^3/\text{h}$  trockene Abgase bei  $\lambda = 2.1$ . Mit der mittleren normierten Konzentration von 931 mg/m<sup>3</sup> CO erhalten wir daraus 31.8 g/h Kohlenmonoxid. Dieses Kohlenmonoxid enthält 322 kJ/h oder 0.09 kW Verluste. Insgesamt haben wir also:

$$\text{Abgasverluste} = 1.25 \text{ kW} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1.25}{17.88} 100 \% = 7.0 \% .$$

Die restliche Leistung von 2.89 kW sind Wärmeverluste der gesamten Feuerung.

In technischen Angaben zu Feuerungen wird oftmals der *feuerungstechnische Wirkungsgrad* angegeben. Dieser berücksichtigt nur die Abgasverluste.

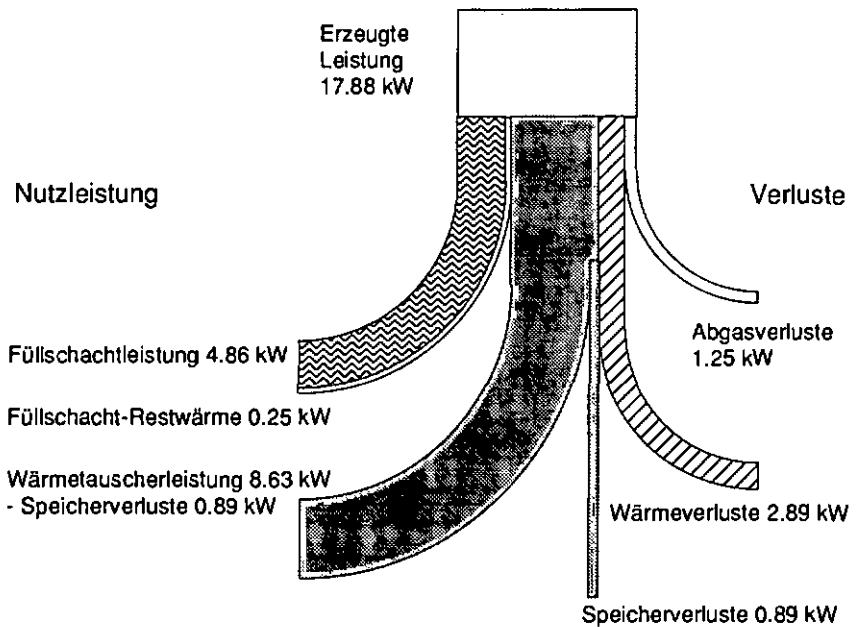
Wir erhalten:

## 5 Testmessungen

$$\text{feuerungstechnischer Wirkungsgrad} = 100 \% - 7 \% = 93 \%$$

In Figur 5.1 zeigen die verschiedenen Flächen, wo die bei der Verbrennung erzeugte Energie schliesslich anfällt.

Die Wärmeverluste von 2.89 kW plus die Speicherverluste von 0.89 kW sind deutlich grösser als nötig. Der Grund dafür liegt darin, dass bei der Versuchsfeuerung einige Löcher in die Isolation geschnitten werden mussten, um die Wärmehändler einzubauen. Durch diese Löcher und auch durch andere Spalten zwischen den verschiedenen Platten der Verschalung kann Luft hinter der Isolation durchzirkulieren. Diese Konvektionsströmungen reduzieren natürlich den Effekt der ansonsten guten Wärmeisolation der Feuerung und des Speichers.

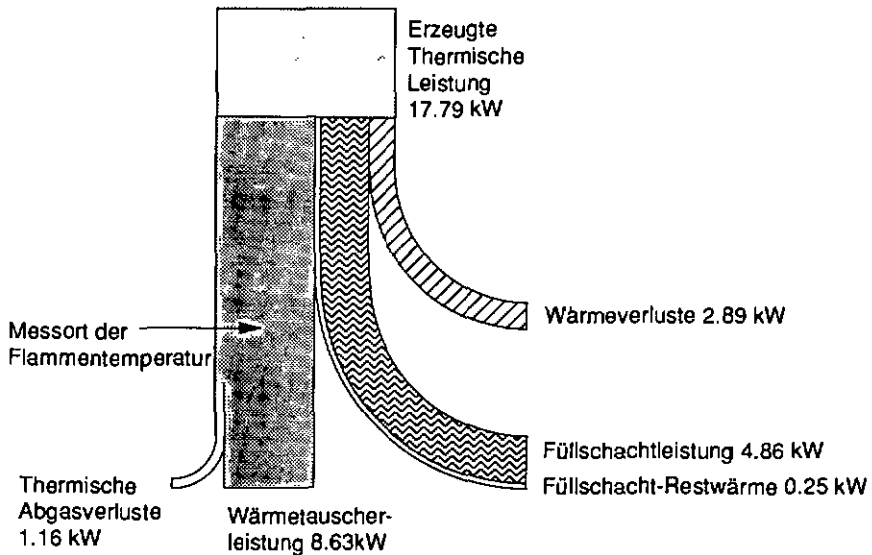


Figur 5.1 Verteilung des Energieflusses in der Feuerung

## 5.5 Flammentemperatur

Bei der Berechnung der realen Flammentemperatur am Ort des Thermoelementes müssen wir berücksichtigen, dass die Abgase auf dem Weg bis zum Thermoelement einen Teil der Reaktionswärme aus der Holzverbrennung verlieren. Ein beträchtlicher Teil der Energie wird vom Füllschacht aufgenommen, wie die Wärmemessung an der Wasserkühlung zeigt. Weiter hat auch der Füllschacht Wärmeverluste nach aussen. Die Verluste des Ofenunterteils sind ebenfalls abzuzählen, bis die Gase das Thermoelement erreichen. Somit enthalten die Abgase am Ort des Thermoelementes nur noch die Energie, die in den Wasserkreislauf des Wärmetauschers übergeht, die Verluste des Wärmetauschers an die Umgebung und die Abgasverluste.

Für unseren Referenzversuch ergibt sich eine Energieverteilung nach Figur 5.2



Figur 5.2 Mittlere Leistungsverteilung in unserer Feuerung während des Referenzversuchs. Von der erzeugten Leistung sind die chemischen Verluste bereits abgezogen.

Leider können wir von den totalen Wärmeverlusten die Verluste des Wärmetauschers allein nicht trennen. Wenn wir diese den Ofenverlusten

## 5 Testmessungen

zuschlagen, erhalten wir eventuell eine geringfügig zu niedrige Flammentemperatur. Setzen wir in Gleichung 3.18 eine um den Faktor

$$\frac{\text{Wärmetauscherleistung} + \text{Abgasverluste}}{\text{erzeugte Leistung}} = 0.55$$

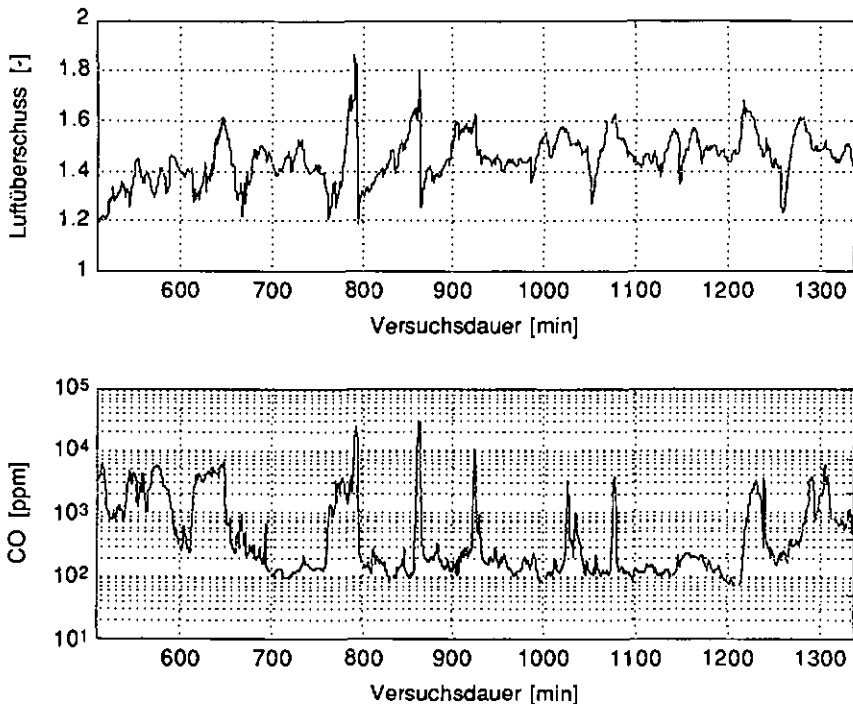
geringere Verbrennungsenthalpie ein, als sie dem Heizwert entspricht, so erhalten wir unter der Annahme eines Luftüberschusses von 1.42 und der gegebenen Holzzusammensetzung eine Flammentemperatur von  $871\text{ °C} + 21\text{ °C}$  Umgebungstemperatur =  $892\text{ °C}$ . Gemessen haben wir  $897\text{ °C}$ . Der Mittelwert der gemessenen Flammentemperatur stimmt also hervorragend mit der berechneten überein.

***Ebenfalls sehen wir, dass die Flammentemperatur bei gleichbleibendem Luftüberschuss am besten durch eine Veränderung der Wärmeübertragung von der Glut an die Füllschichtwände beeinflusst werden kann.***

## 5.6 Typischer Verlauf der Verbrennung einer Charge Holz

Die folgenden Graphiken zeigen den zeitlichen Verlauf der kontinuierlich gemessenen Größen während des Referenzversuchs. Dargestellt wird in den folgenden Figuren der Zeitabschnitt vom Auffüllen auf ein bestehendes Glutbett bis zum Abbrand auf ein Glutbett des gleichen Gewichtes. Wir können daraus entnehmen, in welchem Bereich die Schwankungen der Messgrößen liegen. Verschiedene Korrelationen im zeitlichen Ablauf einiger Größen werden ebenfalls durch die Graphiken verdeutlicht.

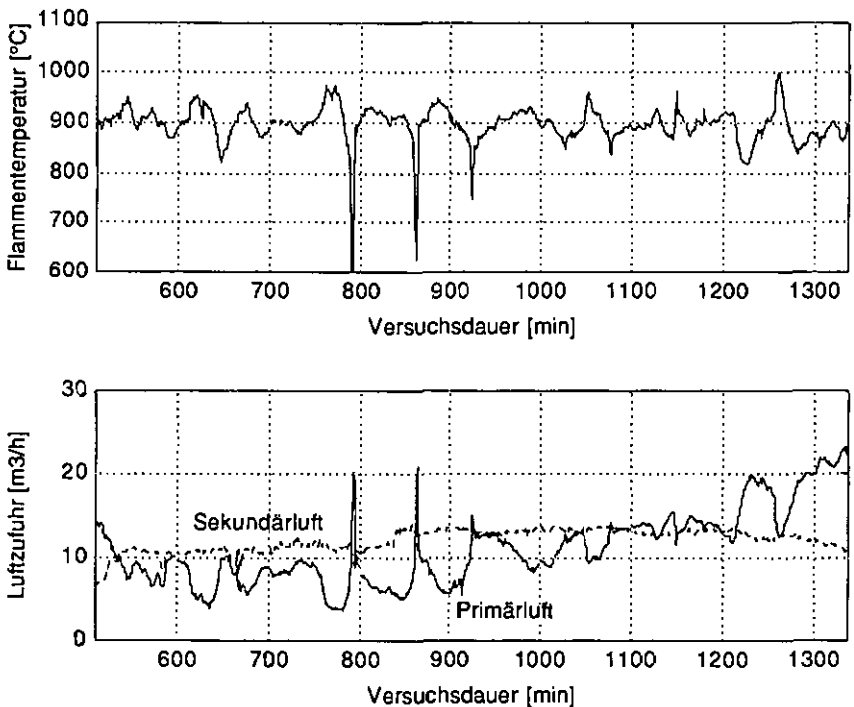
Figur 5.3 zeigt, dass der Luftüberschuss während des Versuchs meist in einem Bereich liegt, der eine vollständige Verbrennung erlaubt. Die Kohlenmonoxidkonzentration weist nur einige kurze Spitzen auf. Man erkennt deutlich, dass die CO-Emissionen bei zu hohem Luftüberschuss steil ansteigen.



Figur 5.3: Luftüberschuss (berechnet aus der Sauerstoffkonzentration) und Kohlenmonoxidkonzentration.

## 5 Testmessungen

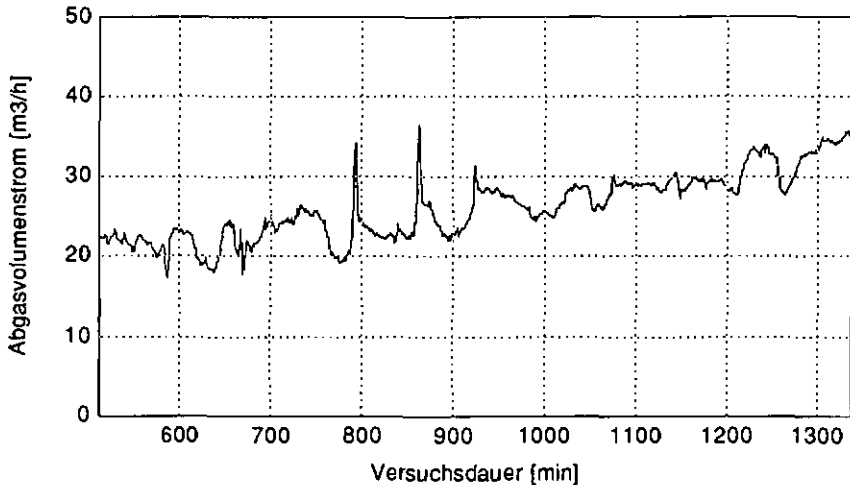
Um die Verbrennungsrechnung experimentell nachvollziehen zu können, muss die Verbrennung immer annähernd vollständig sein. Dies kann an besten mit einer geregelten Luftzufuhr erreicht werden. Deshalb wurde die Primärluftzufuhr von einem in Kapitel 7 beschriebenen PI-Regler kontrolliert. (Dabei haben wir noch mit einer Abtastgeschwindigkeit von einer Minute gearbeitet. Die Proportionalkonstante betrug  $0.05 \text{ m}^3/\text{h K}$ ; die Integrationskonstante  $600 \text{ s}$ . Der Sollwert der Flammentemperatur war  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Die Sekundärluft liessen wir dabei fest eingestellt. Weil sich der Innendruck der Feuerung unter anderem wegen variabler Primärluftzufuhr verändert, ändert sich auch die Sekundärluft geringfügig, auch wenn die Ventilator Drehzahl konstant bleibt.



Figur 5.4: Flammentemperatur und Luftzufuhr.

Figur 5.4 zeigt, dass die Primärluftzufuhr deutlich verändert werden muss, um die Flammentemperatur konstant zu halten. Starke Ausschläge der Primärluft nach oben geht ein steiler Abfall der Flammentemperatur voraus, welcher auf ein Loch in

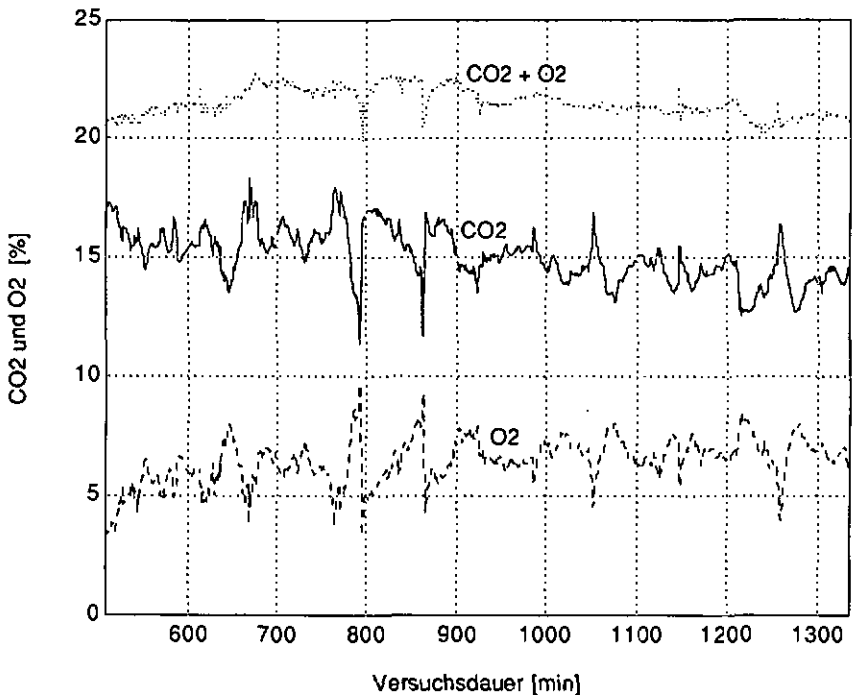
der Glut schliessen lässt. Die erhöhte Primärluftzufuhr bewirkt ein forciertes Nachrutschen des Holzes, deshalb wird schnell wieder ein stabiler Zustand erreicht. Weil das bereits teilweise entgaste Holz weniger Sauerstoff enthält, braucht es gegen Ende des Versuches mehr Primärluft, um die Flammentemperatur beim Sollwert zu halten.



Figur 5.5 Abgasvolumenstrom

Figur 5.5 zeigt den Abgasvolumenstrom. Der Anstieg des Abgasvolumenstroms widerspiegelt die langsame Zunahme der Gesamtluftzufuhr. Der Abgasvolumenstrom entspricht im wesentlichen der Luftzufuhr plus dem Wasserdampf in den Abgasen.

## 5 Testmessungen

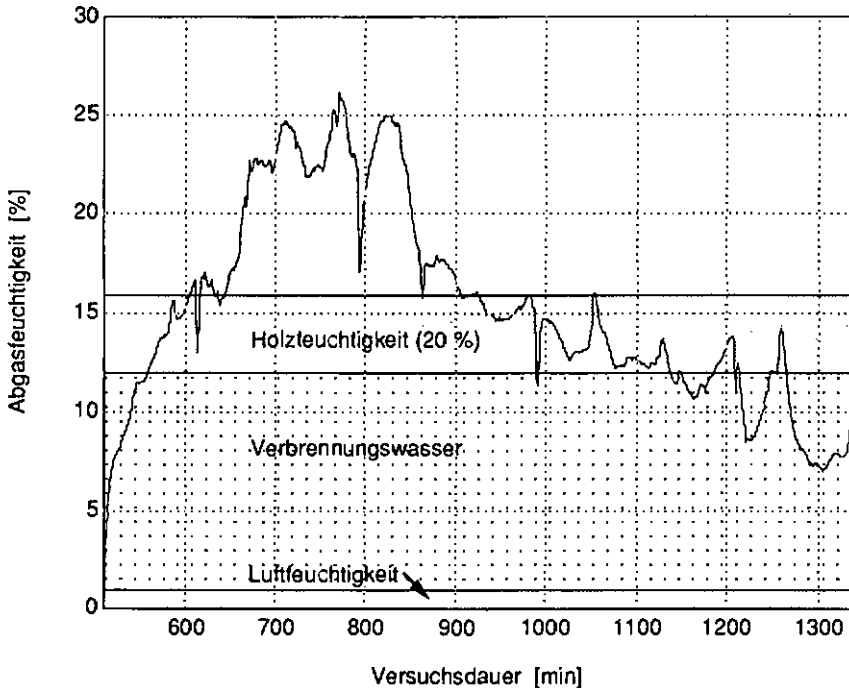


Figur 5.6: Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration sowie deren Summe.

Figur 5.6 zeigt den spiegelbildlichen Verlauf der Konzentrationen von Sauerstoff und Kohlendioxid. Aus Gleichung (3.14) folgt, dass die Summe von CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalt relativ unabhängig vom Luftüberschuss immer ungefähr 21 % ergibt. Aus den Mittelwerten der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 14.56 % und der O<sub>2</sub>-Konzentration von 6.46 % erhalten wir die Summe 21.02 %, was unsere Theorie bestätigt.

Zusätzlich wurde bei diesem Versuch auch noch der Wasserdampfgehalt der Abgase mit einem Prall-Psychrometer gemessen. Direkt nach dem Einfüllen ist das Holz noch kalt und gibt kaum Feuchtigkeit ab; es verbrennt noch die trockene Holzkohle im Glutbett. Mit steigender Erwärmung wird dann offensichtlich die ganze Holzfüllung getrocknet; der so freigesetzte Wasserdampf addiert sich zum Verbrennungswasser, welches aus der Verbrennung des Wasserstoffes im Holz entsteht. Mit zunehmender Trocknung und Entgasung sinkt dann der Wassergehalt wieder. Dies kommt in Figur 5.7 deutlich zur Geltung.

Aus der Holzfeuchtigkeit von 20 % entstehen nach Kapitel 5.3.2 3.95 % Wasserdampf in den Abgasen. Aus dem Verbrennungswasser stammen weitere 10.9 % und aus der Luftfeuchtigkeit ein letztes Prozent Wasserdampf. Die Tatsache, dass der Feuchtigkeitsgehalt der Abgase gegen Schluss der Verbrennung auf unter 11.9 % fällt, beweist, dass die Veränderung der Abgasfeuchte nicht allein durch die Holz Trocknung erklärt werden kann, da bei der Verbrennung von völlig trockenem Holz der Originalzusammensetzung die Abgasfeuchte genau 11.9 % beträgt.

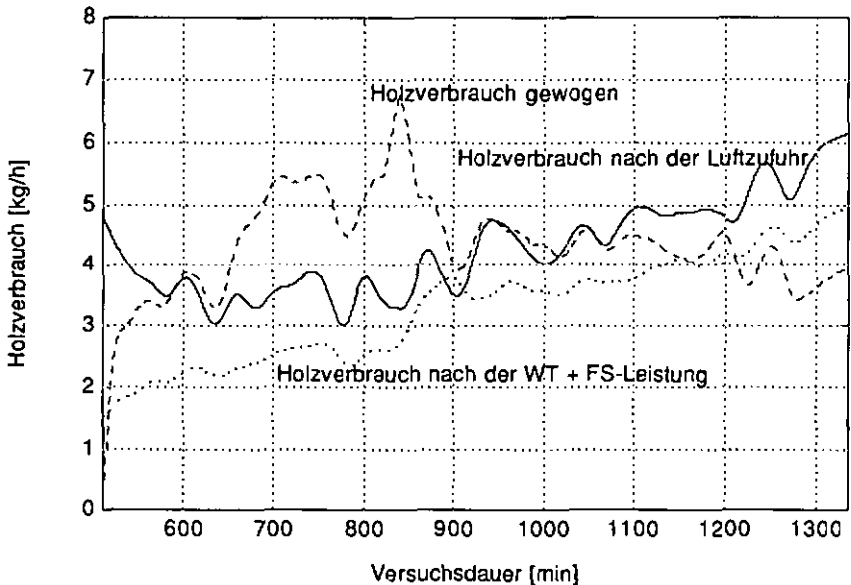


Figur 5.7 Wasser dampfgehalt der Abgase in Volumenprozent, bezogen auf die trockene Abgasmenge. Die markierten Flächen bezeichnen die aus der Holz-zusammensetzung gerechneten durchschnittlichen Werte für die Abgas-feuchte, aufgetrennt in den Teil, der aus der Holzfeuchte stammt und den Anteil Verbrennungswasser. Der schmale Streifen unten markiert den Anteil aus der Luftfeuchtigkeit.

## 5 Testmessungen

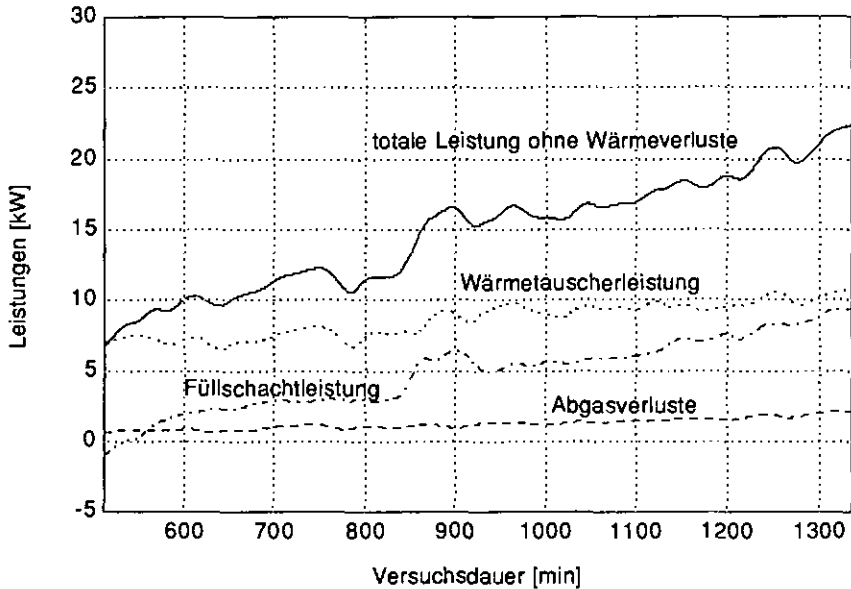
Der Holzabbrand während des Versuchs wird in Figur 5.8 gezeigt. Weil die Auflösung der Waage auf 0.1 kg beschränkt ist und die Gewichtsabnahme deshalb stark fluktuiert, wurde die Messkurve rechnerisch geglättet. Der Verlauf der Kurve widerspiegelt den Trocknungsprozess des Holzes, den wir in Figur 5.7 beobachten können. Zum Vergleich wurden auch die anderen Messkurven dieser Figur auf die gleiche Weise geglättet. Es sind dies der Holzverbrauch berechnet aus der Luftzufuhr, dem Luftbedarf und dem Luftüberschuss nach Formel (3.23) sowie derselbe berechnet aus der Wärmetauscherleistung plus der Füllschachtleistung nach den Formeln (3.21) und (3.22). Die letzten beiden Kurven unterscheiden sich im wesentlichen nur durch die fast konstanten Verluste, weil bei fast gleicher Flammentemperatur die Wärmetauscherleistung etwa proportional zum Durchfluss an Verbrennungsgasen ist.

Aus dem Vergleich des gewogenen Holzverbrauchs mit dem gerechneten erkennt man die Veränderung der Holzzusammensetzung während des Abbrandes. Die gegen den Schluss verbleibende Holzkohle liefert bei höherer Luftzufuhr eine grössere Leistung als das noch feuchte Holz kurz nach dem Einfüllen.



Figur 5.8 Holzverbrauch, berechnet aus den Messgrößen Gewicht, Luftzufuhr und Luftüberschuss sowie aus der im Wasserkreislauf (Wärmetauscher WT und Füllschicht FS) gemessenen Leistung.

Figur 5.9 zeigt den Verlauf der Leistungen aus dem Wärmetauscher, dem Füllschacht und die Abgasverluste. Die oberste Kurve zeigt die Summe der drei unteren. Die Abgasverluste sind nach Kapitel 5.4 berechnet. Alle Kurven sind rechnerisch geglättet, um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu verbessern.



Figur 5.9 Zeitlicher Verlauf der Leistungsanteile während eines Abbrandes.

Alle Leistungen steigen während des Abbrandes an. Die Wärmetauscherleistung steigt fast proportional zur Abgasmenge. Die Füllschachtleistung nimmt noch stärker zu als die Wärmetauscherleistung. Mit zunehmendem Abbrand absorbiert das Holz im Füllschacht weniger Wärme zur Trocknung, und der Wärmeübergang von der Glut auf den Füllschacht wird besser. Insbesondere liegt bei fast leerem Füllschacht keine isolierende Holzschicht mehr auf der Glut. Die Abgasverluste sind gegeben durch die Abgasmenge und die Abgastemperatur, welche beide auch mit fortschreitendem Abbrand zunehmen.

## 6 Modellierung der Feuerung

---

### 6.1 Verhalten der unregelmässigen Feuerung

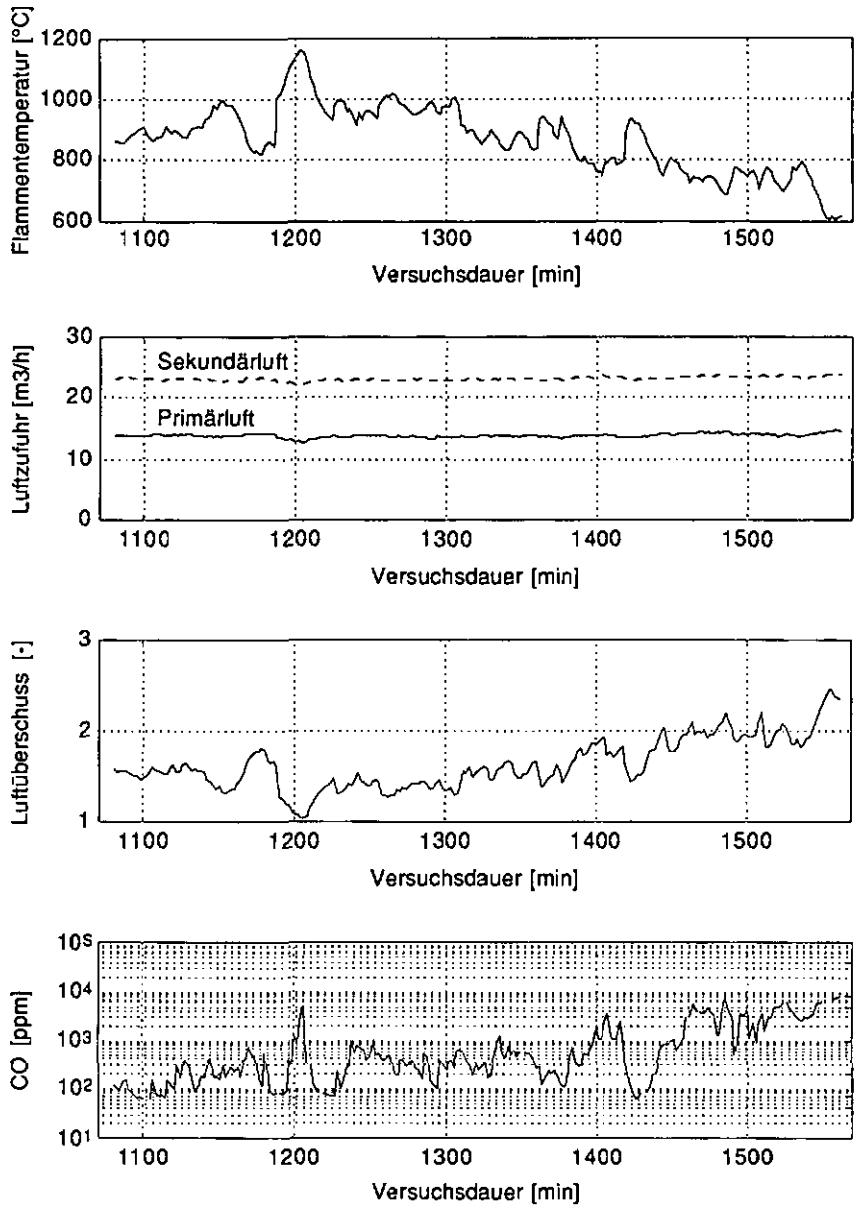
Wir haben viele Versuche mit unregelmässiger Luftzufuhr durchgeführt, um das Abbrandverhalten der Feuerung über lange Zeit zu beobachten. Die Resultate dieser unregelmässigen Versuche zeigen, was eine Regelung der Luftzufuhr überhaupt verbessern soll. Ausserdem konnten wir mit von Hand gesteuerter Luftzufuhr die Zusammenhänge zwischen einem beliebigen Luftüberschuss und der Verbrennungsqualität messen.

#### 6.1.1 Feste Luftzufuhr über einen ganzen Abbrand

Auf ein bestehendes Glutbett in der Feuerung wurde diese mit Buchenscheiten gefüllt. Dann wurden feste Werte für die Primärluft- und Sekundärluftmenge eingestellt und nicht mehr verändert. Weil der Schwankungsbereich des Luftüberschusses ohne Regelung grösser ist als der Bereich des Luftüberschusses mit einer guten Verbrennung, ist diese Einstellung sehr kritisch. Figur 6.1 zeigt einige Messwerte aus einem Versuch, wo diese feste Lufteinstellung nahezu optimal geriet. Folgende Schlüsse können aus diesen Kurven gezogen werden:

- Nach dem Auffüllen sinkt der Luftüberschuss während etwa zwei Stunden, weil wieder brennbares Material auf der Glut liegt und entgast werden kann. Anschliessend steigt der Luftüberschuss kontinuierlich an, weil das eingefüllte Holz zunehmend getrocknet und entgast wird. Der stetig sinkende Anteil an flüchtigen Stoffen im Holz bewirkt eine gleichermassen sinkende Menge an freigesetzten brennbaren Gasen.
- Wenn der Luftüberschuss zu gering wird (bei Minute 1200) oder zu gross wird (ab Minute 1460), steigen die Kohlenmonoxidemissionen deutlich an.
- Weil das Holz unregelmässig nachrutscht, weisen alle gemessenen Variablen starke Fluktuationen auf. Zum Beispiel liegt bei Minute 1160 ein steiler Abfall der Flammentemperatur, zusammen mit einem Anstieg des Luftüberschusses. Dieser wird verursacht durch ein Ausbrennen der Glut, ohne dass genügend neues Holz nachrutscht (Brückenbildung). Der anschliessende Anstieg der Flammentemperatur, zusammen mit dem rapid sinkenden Luftüberschuss, lässt auf ein Durchbrennen der Brücke schliessen. Das nachgerutschte Holz facht die Verbrennung wieder an.

## 6 Modellierung der Feuerung



Figur 6.1 Ausschnitt aus einem unregulierten Versuch mit Buchenholz und fester Lufteinstellung. Auf 11 % O<sub>2</sub> normierter Mittelwert der CO-Emission: 1168 mg/m<sup>3</sup>.

---Weil die Luftzufuhr nicht geregelt wird, sehen wir gleichzeitig zur Brückenbildung zwischen Minute 1170 und 1190 einen geringen Anstieg der Primär- und Sekundärluftzufuhr. Nach dem Durchbrennen der Brücke sinkt die Luftzufuhr wieder ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einem Loch in der Glut der Strömungswiderstand speziell der Primärluft durch die Glut kleiner ist; infolgedessen strömt mehr Luft durch die Feuerung. Nach dem Nachrutschen des Holzes ist die Glut wieder kompakt und weist einen höheren Strömungswiderstand auf.

### 6.1.2 Variation des Luftüberschusses

Beim in Figur 6.2 dargestellten Versuch führen wir mit der Primär- und Sekundärluftmenge eine Rampenfunktion ab. Die anfänglich grosse Sekundärluftmenge bewirkt einen hohen Luftüberschuss. Die stufenweise Erhöhung der Primärluftzufuhr brachte die Feuerung in einen Luftmangelzustand. Anschliessend wurde die Primärluft wieder reduziert, bis die Verbrennung wieder bei zu hohem Luftüberschuss verlief. Ebenso erreicht man einen Luftmangel durch die Sekundärluftreduktion danach.

***Der Luftüberschuss der Feuerung ist offensichtlich sowohl über die Primär- als auch über die Sekundärluft in weiten Bereichen steuerbar.***

Zusätzlich erkennt man die folgenden Zusammenhänge:

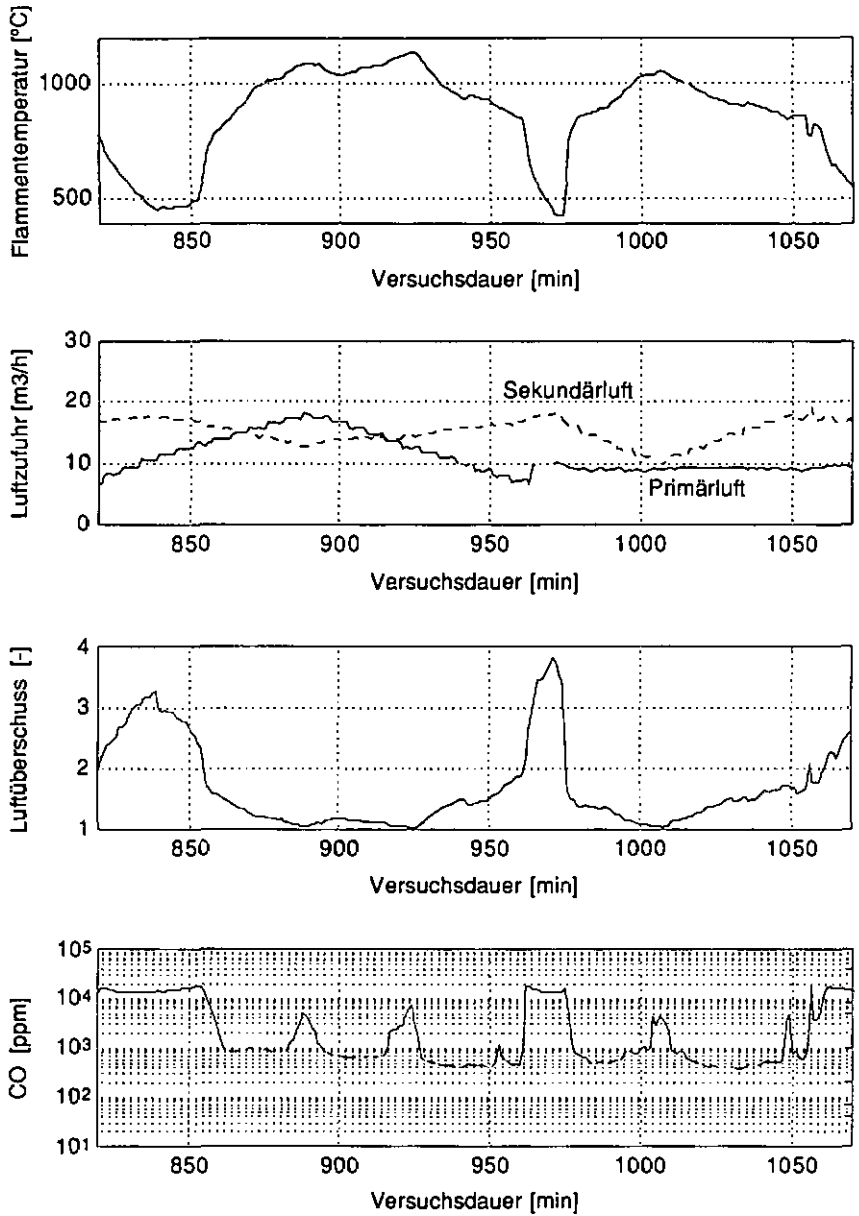
---Das Verhältnis von Luftzufuhr zum Luftüberschuss ist nicht reproduzierbar, weil Störungen auf das Glutbett einwirken. Abhängig von der Dichte und Zusammensetzung des Holzes im Glutbett entspricht einem Luftüberschuss ein anderes Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft.

---Die Flammentemperatur verläuft in auffälliger Weise reziprok zum Luftüberschuss, dies geht bereits aus der Theorie in Kapitel 3.3 hervor.

---Ganz deutlich sehen wir auch hier, wie die Kohlenmonoxidemissionen bei zu kleinem oder zu grossem Luftüberschuss ansteigen.

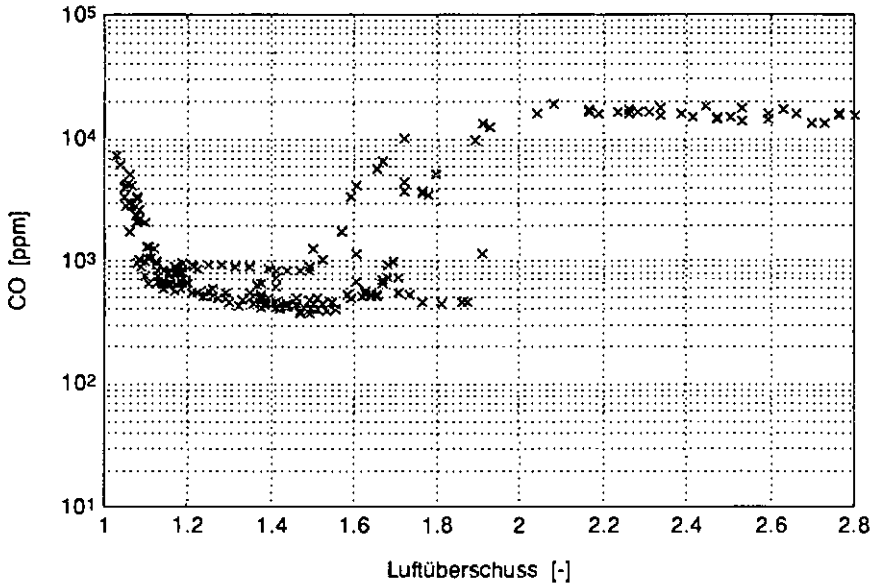
Weil bei diesem Versuch alle erreichbaren Stadien des Luftüberschusses bei der Verbrennung mehrere Male durchlaufen werden, ist diese Messung hervorragend geeignet, das Verbrennungsverhalten unserer Versuchsfeuerung zu beschreiben. Die logarithmische Darstellung der Kohlenmonoxidemission, aufgetragen gegen den Luftüberschuss, zeigt auf eine charakteristische Weise das Verbrennungsverhalten einer Feuerung. In [4] wurde diese Darstellung vorgeschlagen, weil sie die Qualitäten einer Feuerungskonstruktion anschaulich aufzeigt. Im weiteren wird diese Darstellungsart  $\text{CO}(\lambda)$ -Charakteristik genannt.

## 6 Modellierung der Feuerung



Figur 6.2 Beeinflussung des Luftüberschusses durch die gesteuerte Luftzufuhr und deren Auswirkungen auf die Verbrennungsqualität und Flammentemperatur.

Anhand der Darstellung in Figur 6.3 erkennen wir sofort, in welchem Bereich des Luftüberschusses gute Verbrennungswerte möglich sind. Um eine gute Verbrennung zu garantieren, sollte der Luftüberschuss bei unserer Versuchsfeuerung im Bereich zwischen 1.2 bis 1.6 liegen.



Figur 6.3 Logarithmische Darstellung der Kohlenmonoxidemission, aufgetragen gegen den Luftüberschuss. Jede Messung im Abstand von einer Minute aus dem in Figur 6.2 dargestellten Versuch wird hier durch ein Kreuz repräsentiert.

Die untere Grenze der Emissionswerte ist durch die Ofenkonstruktion bestimmt. Bei optimalem Luftüberschuss bestimmen die Flammentemperatur, die Durchmischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft und die Verweildauer der Gase in der heissen Zone die Ausbrandqualität. Bei unserer Versuchsfeuerung könnte die Durchmischung durch ein noch engeres Flammenrohr gefördert werden; dieses müsste ebenfalls verlängert werden um die Verweilzeit nicht zu verkürzen. Eine grössere Verweilzeit ergäbe eventuell sogar eine Erweiterung des Bereichs der guten Verbrennung über den Luftüberschuss von 1.6 hinaus. Der Preis dafür wäre allerdings ein grösserer Druckabfall im Rohr. Die hervorragende Isolation unseres Flammenrohres ermöglicht eine genügend hohe Temperatur für einen vollständigen Ausbrand.

### 6.2 Beschreibung der Verbrennungsqualität

Die Betriebsweise einer Stückholzfeuerung kann beschrieben werden durch die Feuerungsleistung und den Luftüberschuss. Als übergeordnete Qualitätskriterien kommen der Wirkungsgrad und die Emissionen in Frage. Beide hängen sowohl von der Feuerungskonstruktion als auch von der Betriebsweise ab. Weil das Qualitätskriterium unabhängig von der Feuerungskonstruktion und -leistung sein soll, betrachten wir nur die Abhängigkeit von Wirkungsgrad und Emissionen vom Luftüberschuss. Die Emissionen können sich bei geringen Änderungen des Luftüberschusses um Größenordnungen ändern; dabei bleibt der Wirkungsgrad hingegen nahezu unverändert (z. B. bei einem Luftüberschuss nahe bei eins).

***Die Emissionen reagieren wesentlich empfindlicher auf den Luftüberschuss als der Wirkungsgrad. Infolgedessen wählen wir als übergeordnetes Ziel der Regelung die Reduktion der Emissionen.***

Weiterhin dürfte es wesentlich einfacher sein, die gesetzlichen Bestimmungen bezüglich des Wirkungsgrades einzuhalten als die in Bezug auf die Emissionen.

Untersuchungen von Marutzky und Schriever [14] sowie Nussbaumer [9] haben gezeigt, dass die alleinige Messung der Kohlenmonoxidemission die gesamten Emissionen genügend gut charakterisiert. Ungefähr beim Minimum der Kohlenmonoxidemission sind auch die Kohlenwasserstoffemissionen minimal. Deshalb beschränken wir uns bei der Messung der Emissionen auf das Kohlenmonoxid.

#### 6.2.1 Messung der Verbrennungsqualität

Die Messung der Kohlenmonoxidemissionen ist aufwendig und teuer. Auch die Gasaufbereitung (Filterung und Trocknung der Abgase) muss berücksichtigt werden. Deshalb kommt eine derartige Gasanalyse für die Regelung nicht in Frage.

Wie wir bereits früher gesehen haben, sind viele unserer Messgrößen miteinander verknüpft. So zeigt Figur 6.3 den Zusammenhang zwischen dem Luftüberschuss und den Kohlenmonoxidemissionen. Daraus leiten wir ab, dass für minimale CO-Emissionen der Luftüberschuss innerhalb eines Bereichs von 1.2 bis 1.6 liegen sollte. Nach Kapitel 3 können wir den Luftüberschuss aus der Sauerstoff- oder der Kohlendioxidkonzentration der Abgase berechnen. Die Messung dieser Gaskonzentrationen ist ebenso aufwendig wie die direkte Messung der CO-Konzentration und kommt somit auch nicht in Frage.

Eine bereits heute verwendete Alternative zur Messung des Sauerstoffgehalts der Abgase sind die Zirkonoxid  $\lambda$ -Sonden, welche direkt in den Kamin eingebaut werden. Weil diese beheizt sind, schlagen sich auch kaum Kondensate aus den Abgasen darauf nieder. Diese Sonden messen den Sauerstoffgehalt der nassen Abgase. Der Luftüberschuss lässt sich bei veränderlicher Brennstoffzusammensetzung wegen der unbekanntenen Abgasfeuchtigkeit also nicht genau aus dem abgegebenen Signal berechnen. Ausserdem haben die billigeren Versionen der  $\lambda$ -Sonden nur einen sehr kleinen Messbereich. Deshalb wurden keine Versuche mit  $\lambda$ -Sonden durchgeführt.

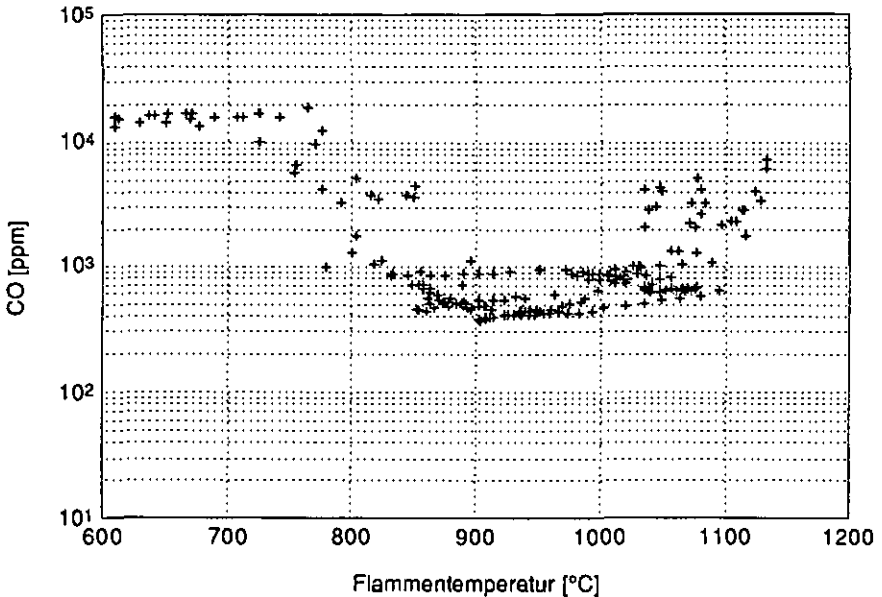
Eine weitere Alternative zur Messung des Luftüberschusses oder auch der Schadstoffemissionen sind neuere keramische oder Halbleitersensoren. Diese werden immer billiger, und es erscheinen laufend neue Typen auf dem Markt. Es könnte sich durchaus lohnen, solche Sensoren zu testen. Trotzdem zweifeln wir an der Lebensdauer und Langzeitstabilität derartiger Sensoren; die speziellen Bedingungen bei Feststofffeuerungen mit deren Anfahr- und Abstellphasen sind bei Messungen im Abgasstrom nicht gerade leicht zu ertragen.

Bei der Analyse aller von uns gemessenen Grössen fiel uns die gute Korrelation zwischen der Flammentemperatur und dem Luftüberschuss auf. Im Kapitel 3.3 wird der theoretische Zusammenhang zwischen der Flammentemperatur und dem Luftüberschuss beschrieben. Über den Umweg der  $\text{CO}(\lambda)$ -Charakteristik erhalten wir somit den Zusammenhang zwischen der Flammentemperatur und der  $\text{CO}$ -Emission. Figur 6.4 zeigt uns diese  $\text{CO}(\text{Flammentemperatur})$ -Charakteristik für den selben Versuchsabschnitt wie in Figur 6.3 direkt. Wie wir sehen, besteht tatsächlich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den  $\text{CO}$ -Emissionen und der Flammentemperatur.

Versuche mit einer einfachen Flammentemperaturregelung waren so erfolgreich, dass wir auf das Austesten anderer Sensoren verzichteten. Die Messung der Flammentemperatur mit Thermoelementen des Typs K ist recht preisgünstig, technisch bewährt und garantiert auf lange Zeit stabile Messungen. Ein Ausfall des Thermoelementes kann zudem einfach detektiert werden (Messung auf offenen Stromkreis oder Kurzschluss).

***Wir wählen infolgedessen die Flammentemperatur als Messgrösse für die Verbrannungsqualität.***

## 6 Modellierung der Feuerung



Figur 6.4 Logarithmische Darstellung der Kohlenmonoxidemission in Funktion der Flammentemperatur. Die Daten stammen aus dem gleichen Versuch wie diejenigen in den Figuren 6.2 und 6.3.

### 6.3 Luftzufuhr

Bei jeder Feuerung bestimmt das Verhältnis von Luft- zu Brennstoffzufuhr den Luftüberschuss und damit auch die Verbrennungsqualität. Obwohl bei einer Stückholzfeuerung die *Holzzufuhr* nicht kontinuierlich steuerbar ist, ermöglicht uns eine getrennte Zuführung von Primär- und Sekundärluft den *Holzabbrand* zu steuern. Die Primärluftmenge allein bestimmt, wieviel Holz abgebrannt wird. Wie wir in Kapitel 6.1.2 gesehen haben, ist der Luftüberschuss bei unserer Feuerung prinzipiell über die Primär- oder über die Sekundärluft steuerbar.

Zur Begründung der Wahl der Stellgröße beschreiben wir im folgenden die Schrittantworten der Luftzufuhr. Als Messgröße haben wir bereits die Flammentemperatur gewählt, welche wir mit einem speziellen, nur 1mm dicken Thermoelement fast verzögerungsfrei messen können. Die Gasanalyse weist im Gegensatz dazu bis zum Füllen der Messküvetten eine zeitliche Verzögerung von etwa

einer halben Minute auf. Trotzdem zeigen wir in den Schrittantworten zum Vergleich noch den aus der Sauerstoffkonzentration berechneten Luftüberschuss. Die Abtastrate betrug bei den folgenden Messungen 10 Sekunden.

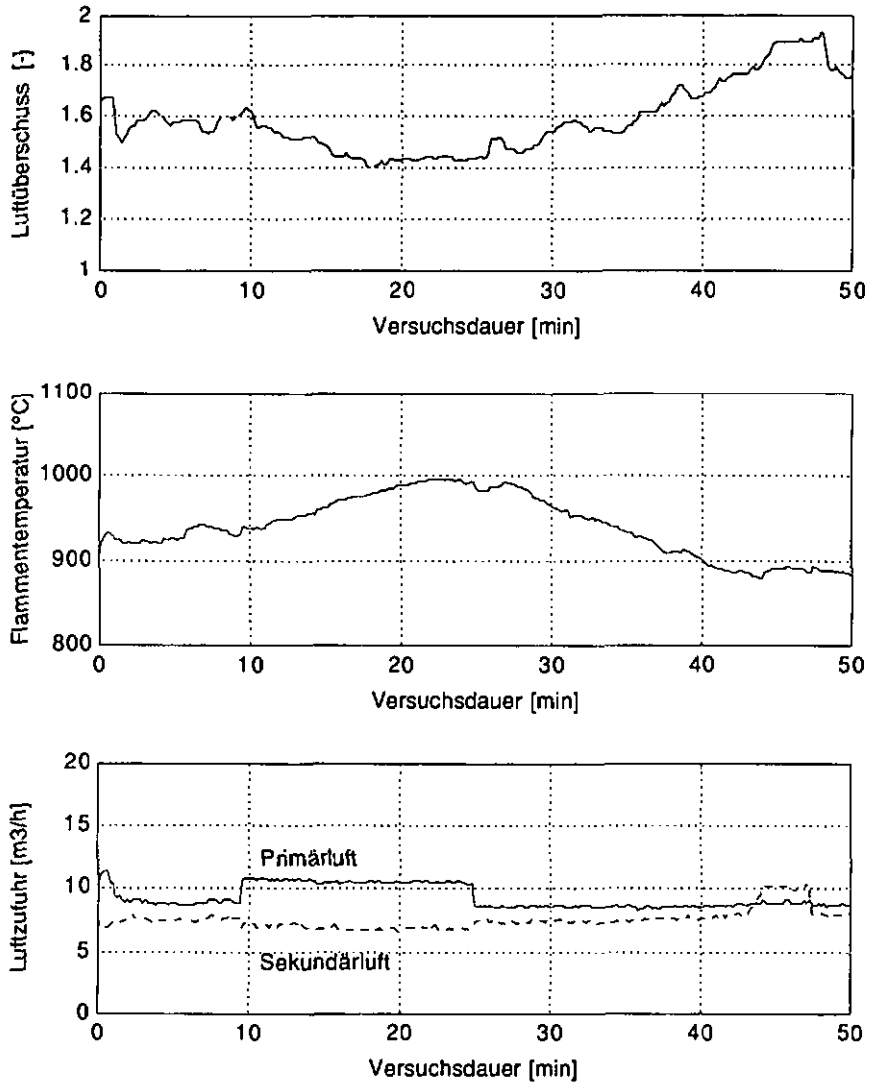
Die Schrittantworten wurden folgendermassen gemessen: Während einer guten Verbrennungsphase haben wir die Luftzufuhr schrittweise verstellert. Nach einer Veränderung der Sekundärluft stellt sich relativ schnell ein neuer Gleichgewichtszustand ein. Hingegen ist es schwierig, ein wirkliches Gleichgewicht nach einer Primärluftveränderung zu erreichen. Weil die Verbrennung oft nicht lange genug stabil bleibt, kann man die provozierte Veränderung nach einiger Zeit nicht mehr von Störungen unterscheiden. Speziell kleine Veränderungen der Luftzufuhr werden schnell von Störungen überdeckt.

### 6.3.1 Primärluftzufuhr

Eine Erhöhung der Primärluftzufuhr bewirkt ein besseres Sauerstoffangebot in der Glut. Die Reaktionswärme der daraus folgenden Oxidationsreaktionen intensiviert die Vergasung und vergrössert das Volumen der aktiven Glut. Die zusätzlich freigesetzten Gase benötigen einen Teil der überschüssigen Luft zum Verbrennen, bei gleichbleibender Sekundärluftzufuhr sinkt somit der Luftüberschuss. Eine erste Reaktion auf die Primärlufthöherung erfolgt nach unseren Messungen in weniger als 10 Sekunden, die maximale Wirkung wird aber erst nach 10 bis 15 Minuten erreicht.

Figur 6.5 zeigt die Reaktion der Verbrennung auf die Primärluftzufuhr. In der oberen Kurve ist der Luftüberschuss  $\lambda$  aufgezeichnet. Dieser wurde aus der Sauerstoffkonzentration der Abgase berechnet; wir erkennen an der verzögerten Reaktion auf die Luftzufuhr die Totzeit der Gasanalyse. Ausserdem sahen wir, dass die Kurve der Flammentemperatur gespiegelt zu der des Luftüberschusses verläuft. Wegen einer langsamen Transformation des Glutbettes erreichen der Luftüberschuss und die Flammentemperatur trotz gleicher Luftzufuhr am Ende des Versuchs nicht mehr die selben Werte wie am Anfang.

## 6 Modellierung der Feuerung



Figur 6.5 Reaktion der Flammentemperatur und des Luftüberschusses auf ein schrittweises Verstellen der Primärluftzufuhr.

Zu Beginn des Versuchs von Figur 6.5 haben wir einen Luftüberschuss von fast 1.6 bei einer gesamten Luftzufuhr von etwa  $16.5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Daraus folgt, dass nur  $10.3 \text{ m}^3/\text{h}$  an der Verbrennung beteiligt sind, davon sicher praktisch die gesamten  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  aus der Primärluft. Wenn die Vergasung proportional zur Primärluftzufuhr reagierte, so würden nach deren Erhöhung von 9 auf  $11 \text{ m}^3/\text{h}$  maximal  $11/9$  mal mehr Luft an der Verbrennung teilnehmen, d. h.  $12.6 \text{ m}^3/\text{h}$  von total  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Die Sekundärluftmenge ging bei der Erhöhung der Primärluft um  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$  zurück). Dies wiederum entspräche einem Luftüberschuss von 1.43. Bei der vorliegenden Messung sinkt der Luftüberschuss tatsächlich auf etwa 1.45.

***Die Entgasungsreaktionen verlauten also durchaus ungefähr proportional zur Primärluftmenge; eine stabile Verbrennung mit einem kompakten Glutbett vorausgesetzt.***

Der Zusammenhang zwischen dem Luftüberschuss und der gemessenen Flammentemperatur hängt vom variierenden Heizwert des verbrennenden Holzes und von der Energieverteilung in der Feuerung ab (Siehe Figur 5.2). Deshalb kann die Differenz der Flammentemperatur leider nicht aus der Erhöhung der Primärluftzufuhr berechnet werden. Immerhin können wir aus Figur 3.1 grob abschätzen, dass für Holz eine Erhöhung des Luftüberschusses von 1.45 auf 1.6 mit einer theoretischen Verminderung der Flammentemperatur um rund  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  verbunden ist. Weil diese Differenz im Versuch annähernd erreicht wird, können wir folgern, dass die wassersseitige Leistung des Füllschachtes weniger von der Primärluft beeinflusst wird als die Wärmetauscherleistung. Dies deckt sich auch mit der Beobachtung, dass bei grosser und kleiner Feuerungsleistung die Leistung des Füllschachtes etwa gleich bleibt. Die Wärmeabgabe der Glut an den Füllschacht wird vor allem durch die Verbrennungsphase zwischen Auffüllen und Ausbrand bestimmt.

Figur 6.5 zeigt auch, dass die Flammentemperatur sehr empfindlich auf die Primärluft reagiert. Ein Sprung von  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  in der Primärluft bewirkt einen Anstieg der Flammentemperatur von fast  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 6 Modellierung der Feuerung

### 6.3.2 Sekundärluftzufuhr

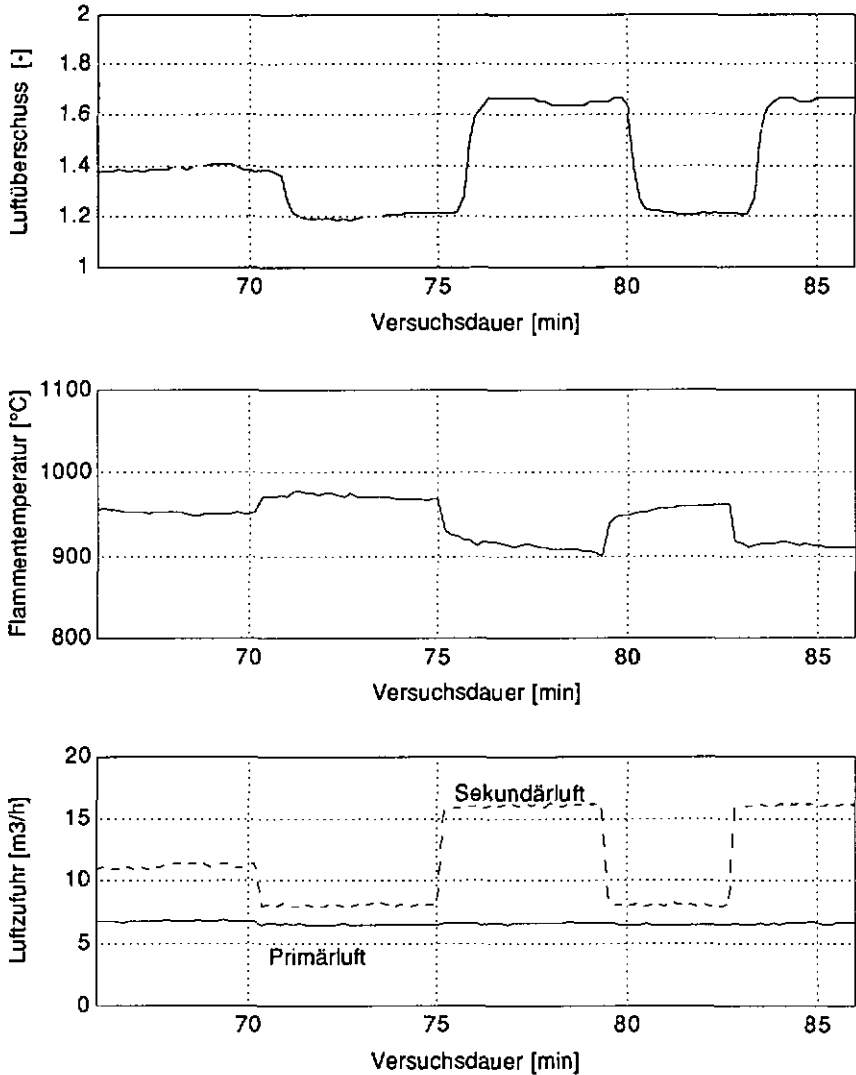
Die Erhöhung einer reinen Sekundärluftzufuhr bewirkt ein höheres Sauerstoffangebot in der Flamme und somit einen höheren Luftüberschuss. Bei vollständiger Verbrennung erfolgt die Reaktion des Luftüberschusses so schnell wie die Änderung der Luftzufuhr; die zusätzliche Luft reagiert chemisch gar nicht mehr. In Figur 6.7 ist ein entsprechender Versuch dargestellt. Der Luftüberschuss in der oberen Kurve folgt der Sekundärluftzufuhr mit einer Verzögerung von 30 s wegen der Gasanalyse.

Die mittlere Kurve dokumentiert ein auffälliges Phänomen: Eine Änderung der Sekundärluft um  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  provoziert bloss eine Veränderung der Flammentemperatur um etwa  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , obwohl der Luftüberschuss erwartungsgemäss drastisch reagiert.

Für diese Erscheinung haben wir die folgende Erklärung gefunden: Die Sekundärluft fliesst in einem Rohr auf einer Strecke von etwa 1 m unter den Schamottesteinen durch und wird dabei auf etliche hundert Grad aufgewärmt. In früheren Versuchen wurden auf dem Blech unter der Schamottierung Temperaturen zwischen  $500$  und  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen. Die Verdünnung der Flamme mit heissen Gasen ändert deren Temperatur bedeutend weniger als deren Verdünnung mit kalten Gasen. Eine Erhöhung der Sekundärluftmenge wirkt sich deshalb nur sehr verzögert auf die Flammentemperatur aus, nämlich erst dann, wenn die Wärmespeicherung in den Steinen erschöpft ist und die übertragene Wärme voll dem Glutbett entzogen wird. Wir sehen in Figur 6.7, dass die Flammentemperatur zuerst sehr schnell reagiert (Durchmischung mit der Sekundärluft) und sich anschliessend langsam einem Gleichgewicht nähert (Erreichen eines neuen Temperaturgleichgewichtes der Schamottierung). Die Primärluft hingegen bewirkt chemische Reaktionen, welche sich bei kalter oder warmer Luft gleichermassen auf die Flammentemperatur auswirken.

Bei unserer Versuchsfeuerung tritt ein Teil der Sekundärluft konstruktionsbedingt in Kontakt mit der Glut und bewirkt dort eine gesteigerte Entgasung, welche der eigentlichen Sekundärluftreaktion entgegenwirkt. Wenn wir von den Startbedingungen bei Minute 73 in Figur 6.7 ausgehen, mit einer Primärluftzufuhr von  $6.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , einer Sekundärluftzufuhr von  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\lambda = 1.2$ , so sind von total  $14.5 \text{ m}^3/\text{h}$  nur  $12.1 \text{ m}^3/\text{h}$  an der Verbrennung beteiligt. Die Erhöhung der Sekundärluftmenge auf  $16 \text{ m}^3/\text{h}$  ergibt total  $22.5 \text{ m}^3/\text{h}$  Luftzufuhr, wovon bei idealer Sekundärluftreaktion immer noch  $12.1 \text{ m}^3/\text{h}$  an der Verbrennung beteiligt sind. Daraus erhalten wir  $\lambda = 1.86$ . Der gemessene Luftüberschuss von knapp 1.7

deutet darauf hin, dass ein kleiner Teil der Sekundärluft auch eine holzvergärende Wirkung hat.

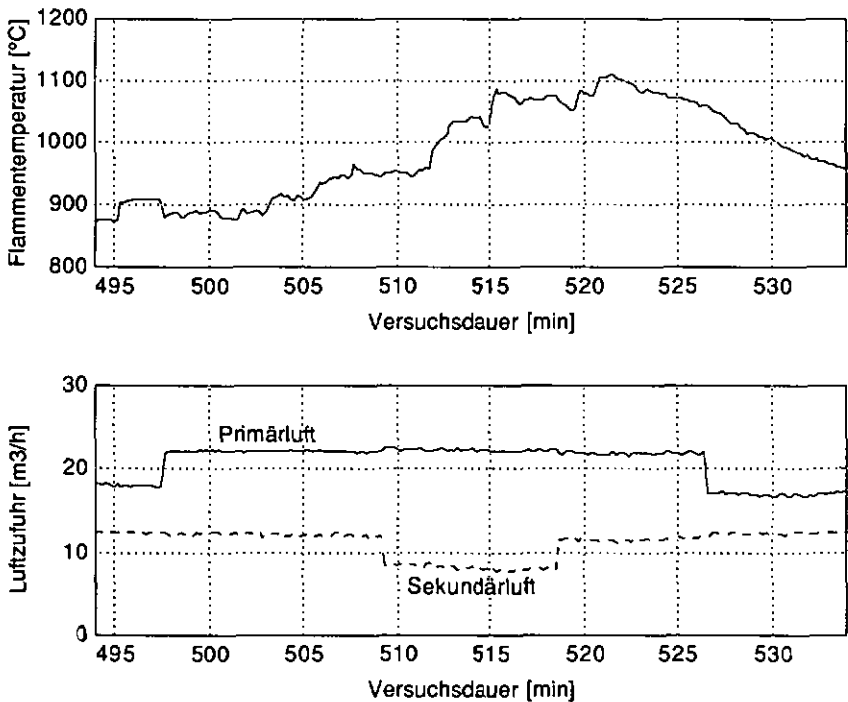


Figur 6.7 Reaktion der Flammentemperatur auf ein starkes schrittweises Verstellen der Sekundärluftzufuhr.

### 6.3.3 Luftzufuhr in der Ausbrandphase

Ein deutlich anderer Zusammenhang zwischen der Primärluft und der Flammentemperatur besteht in der Ausbrandphase, wenn kein Holz mehr auf der Glut liegt. Offensichtlich wird in dieser Phase die Wirkung der Primärluft reduziert, weil weder Holz nachrutschen noch die bestehende Glut intensiver entgast werden kann. Figur 6.6 zeigt die Reaktion der Flammentemperatur auf einen Schritt in der Primärluftzufuhr während der Ausbrandphase. Nach der Erhöhung der Primärluft tritt zuerst ein Verdünnungseffekt auf, welcher die Flammentemperatur senkt. Erst nach 5 Minuten steigt die Flammentemperatur leicht an. Der Einfluss der Sekundärluft ist kaum feststellbar.

**Beim Entwurf eines Reglers muss das unterschiedliche Verhalten der Feuerung in Bezug auf einen genügenden oder aufgebrauchten Holzvorrat auf jeden Fall mit einbezogen werden.**



Figur 6.6 Reaktion der Flammentemperatur auf ein schrittweises Verstellen der Primär- und Sekundärluftzufuhr in der Ausbrandphase.

#### 6.3.4 Wehl der Stellgrösse

Für die Wahl der Sekundärluft als Stellgrösse spricht die schnelle und wohldefinierte Reaktion des Luftüberschusses, und damit auch der Verbrennungsqualität. Die Flammentemperatur reagiert jedoch nur schwach auf die Sekundärluft.

Für die Primärluft spricht die ausgeprägte Reaktion der Flammentemperatur.

Wenn das Holz im Füllschacht schlecht nachrutscht, kann eine vorhandene Blockierung durch eine gesteigerte Primärluftzufuhr durchgebrannt werden. Eine Reduktion der Sekundärluft bleibt jedoch wirkungslos, wenn kein Holz zum vergasen da ist.

***Für Stückholzfeuerungen ist die Primärluft somit die bessere Stellgrösse.***

## 6.4 Zusammenhang zwischen der Primärluft und der Flammentemperatur

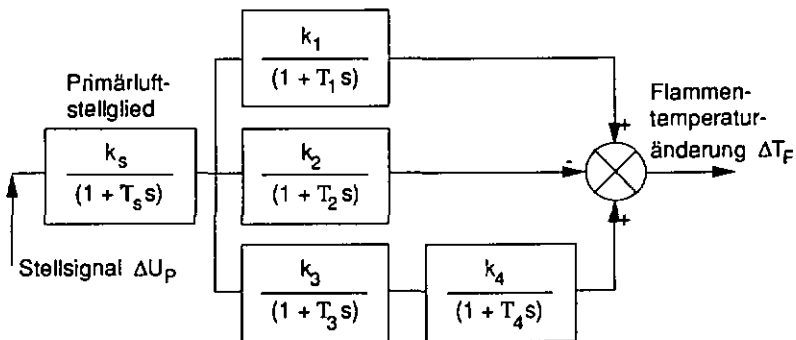
Veränderungen der Primärluftzufuhr führen direkt zu Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Glut und der daraus produzierten Holzgase. Deshalb ändert sich beim Verbrennen der Holzgase mit der Sekundärluft auch die Flammentemperatur. An der in Figur 6.5 dargestellten Reaktion der Flammentemperatur auf die Primärluft können wir folgende Abfolge von Phänomenen beobachten:

- Sofort nach der Zunahme der Primärluft folgt ein steiler Anstieg der Flammentemperatur. Dieser Anstieg ist relativ klein, etwa  $10^{\circ}\text{C}$ .
- Auf diesen Anstieg folgt ein Plateau, welches ungefähr 90 Sekunden dauert.
- Anschliessend steigt die Flammentemperatur langsam an bis zum neuen Gleichgewicht. Dieses wird etwa 15 min nach dem Schritt in der Luftzufuhr erreicht.

Aus diesen Beobachtungen schliessen wir auf den folgenden Ablauf von chemischen und physikalischen Prozessen, welche die Flammentemperatur beeinflussen:

- Der Sprung in der Primärluftzufuhr führt zu einer sofortigen Erhöhung des Sauerstoffangebots in der Glut. Aus der Tatsache, dass die Flammentemperatur unmittelbar nach der Erhöhung der Luftzufuhr steigt, können wir schliessen, dass eine reine Verdünnung durch die zusätzlich zugeführte Luft nicht stattfindet. Die zusätzliche Primärluft reagiert sehr schnell mit der Glut und nicht nur mit den bereits vorher freigesetzten Holzgasen. Wir erklären dies durch eine sofortige chemische Reaktion des Luftsauerstoffs an der Glutoberfläche. Diese exotherme Reaktion treibt durch die Temperaturerhöhung der Oberflächenschicht mehr flüchtige Gase aus der Glut heraus als vor der Lufterhöhung. Die Reaktion erfolgt schnell im Vergleich zur zeitlichen Auflösung unserer Messungen, wir legen die Zeitkonstante  $T_1$  dieser Reaktion auf 3 Sekunden fest.
- Relativ bald ist die Oberflächenschicht entgast, wegen der guten thermischen Isolation der Glutstücke dringt die Wärme nur langsam in tiefere Schichten vor. Ebenfalls begrenzen die Poren der Glutstücke das Eindringen von Luft und den Austritt von flüchtigen Gasen. Die Flammentemperatur fällt also nach dem anfänglichen steilen Anstieg von  $10^{\circ}\text{C}$  wieder um  $7-8^{\circ}\text{C}$  ab, dies entspricht einer gegenüber dem Zustand vor der Lufterhöhung leicht erhöhten Gasproduktion der bestehenden Glut. Die Zeitkonstante  $T_2$  dieses Abfalls liegt bei etwa 50 Sekunden.

- Die Erhöhung der Gluttemperatur sowie der zusätzlich verfügbare Sauerstoff lassen die Glut langsam in das daraufliegende Holz hineinwachsen. Dieses Wachstum der Glut führt zu einem langsamen Anstieg der Produktion an brennbaren Gasen, bis wieder ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Die daraus folgende Erhöhung der Flammentemperatur von insgesamt etwa 80 °C können wir nach den Kurven in Figur 6.5 durch ein Modell zweiter Ordnung mit einer gesamten Zeitkonstante  $T_3 + T_4$  von etwa 400 Sekunden beschreiben. Ein Modell zweiter Ordnung beschreibt diesen Anstieg weit besser als eines erster Ordnung.
- Alle drei beschriebenen Phänomene finden gleichzeitig statt und überlagern sich.
- Das Primärluftstellglied hat eine begrenzte Anstiegsgeschwindigkeit. Einfachheit halber beschreiben wir dessen Verhalten durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung mit einer Zeitkonstante  $T_S$  von 5 Sekunden. Der Zusammenhang zwischen der Steuerspannung  $U_P$  [V] und der Luftzufuhr  $\dot{V}_P$  [m<sup>3</sup>/h] ist linear, die Proportionalkonstante  $k_S$  wählen wir einfachheit halber gleich 1. (Diese Proportionalkonstante kann an unserem Stellglied mit einem Potentiometer eingestellt werden.)
- Das verwendete Thermoelement weist im Vergleich zur Dynamik der Glut vernachlässigbar kleine Zeitkonstante von weniger als 1 s auf. Deshalb schliessen wir das Thermoelement von der Modellierung aus.



Figur 6.6 Modell für die Flammentemperaturreaktion bei Änderungen der Primärluftzufuhr.

## 6 Modellierung der Feuerung

Wir erhalten das Blockdiagramm aus Fig. 6.8. Aus diesem Modell ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta T_F}{\Delta U_P} &= G_S G_F = \left( \frac{k_S}{1 + T_{SS}} \right) \left( \frac{k_1}{1 + T_1 s} - \frac{k_2}{1 + T_2 s} + \frac{k_3 k_4}{(1 + T_3 s)(1 + T_4 s)} \right) \\ &= \left( \frac{k_S}{1 + T_{SS}} \right) \left( \frac{e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0}{d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0} \right)\end{aligned}$$

wobei:

$\Delta T_F$  = Flammentemperaturänderung

$\Delta U_P$  = Änderung des Primärluftzufuhrstellsignals

$G_S$  = Übertragungsfunktion des Stellantriebs

$G_F$  = Übertragungsfunktion der Feuerung

$e_3$  =  $k_1 T_2 T_3 T_4 - k_2 T_1 T_3 T_4$

$e_2$  =  $k_1 (T_2 T_3 + T_3 T_4 + T_4 T_2) - k_2 (T_1 T_3 + T_3 T_4 + T_4 T_1) + k_3 k_4 T_1 T_2$

$e_1$  =  $k_1 (T_2 + T_3 + T_4) - k_2 (T_1 + T_3 + T_4) + k_3 k_4 (T_1 + T_2)$

$e_0$  =  $k_1 - k_2 + k_3 k_4$

$d_4$  =  $T_1 T_2 T_3 T_4$

$d_3$  =  $T_1 T_2 T_3 + T_1 T_2 T_4 + T_1 T_3 T_4 + T_2 T_3 T_4$

$d_2$  =  $T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_1 T_4 + T_2 T_3 + T_2 T_4 + T_3 T_4$

$d_1$  =  $T_1 + T_2 + T_3 + T_4$

$d_0$  = 1

Aus den experimentellen Resultaten entnehmen wir die folgenden Konstanten:

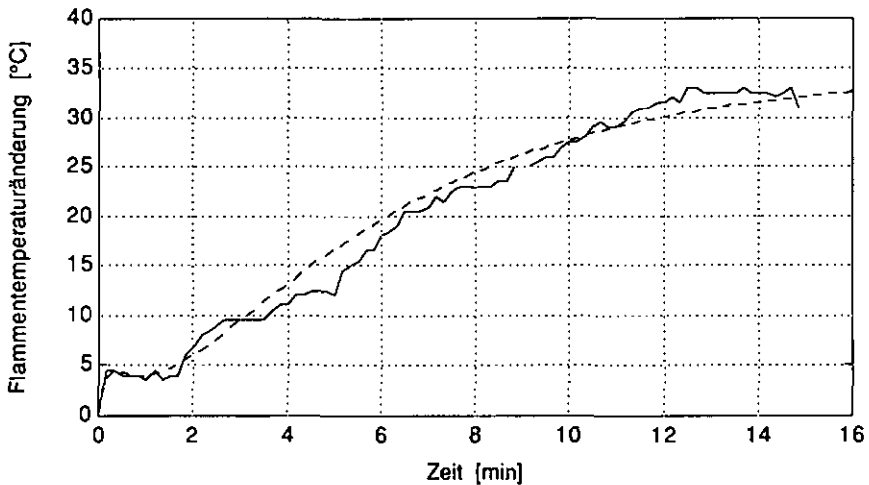
$$k_S = 1; \quad [(\text{m}^3/\text{h}) / \text{V}]$$

$$T_S = 5 \text{ s};$$

$$k_1 = 6; \quad k_2 = 5; \quad k_3 \quad k_4 = 34; \quad [^\circ\text{C} / (\text{m}^3/\text{h})]$$

$$T_1 = 3 \text{ s}; \quad T_2 = 50 \text{ s}; \quad T_3 = 100 \text{ s}; \quad T_4 = 300 \text{ s}$$

Die gemessene Schrittantwort der Flammentemperatur und die der oben genannten Übertragungsfunktion sind sich in Figur 6.9 gegenübergestellt.

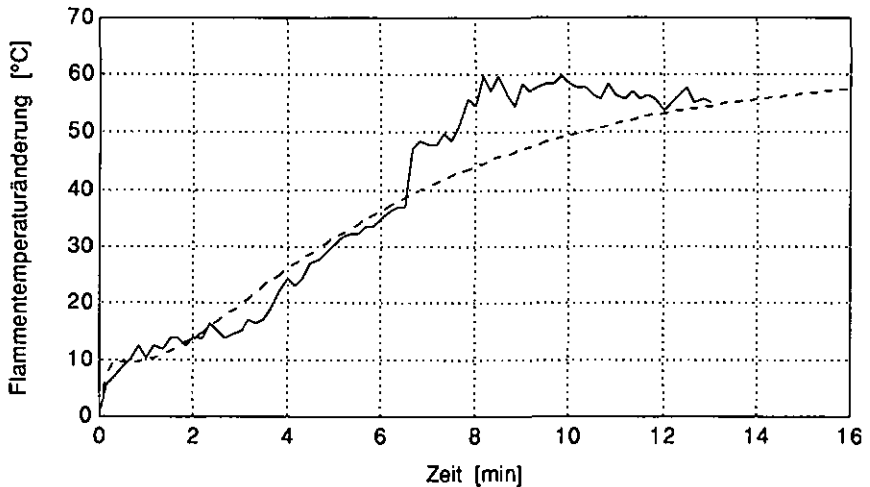


Figur 6.9 Gemessene (ausgezogene Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Schrittantwort der Flammentemperatur auf eine Primärluftfeuchteerhöhung von  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Der Versuch wurde mit Buchenholz mit 17.6 % Feuchtigkeit durchgeführt.

Wir haben hier das einfachste Modell beschrieben, das wir finden konnten, welches die Schrittantwort in Figur 6.9 reproduziert. Zudem entspricht das Modell einer groben Vorstellung, die wir von den physikalischen und chemischen Vorgängen in der Glut haben.

## 6 Modellierung der Feuerung

Zur Verifizierung des obigen Modells zeigen wir in Figur 6.10 eine Schrittantwort von der Verbrennung von Tannenholz. Bei beiden Versuchen betrug die Sekundärluftzufuhr etwa  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ ; die Primärluftzufuhr wurde von etwa 8 auf  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  erhöht. Offensichtlich reagiert Tannenholz stärker auf Primärluftänderungen als Buchenholz. Die intensivere Entgasung von Tannenholz deckt sich mit der allgemeinen Erfahrung, dass Weichholz schneller brennt als Hartholz [26]. Für die Modellierung muss das Produkt der Konstanten  $k_3 k_4$  hier auf  $55 [^\circ\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})]$  erhöht werden. Ebenso ist der anfängliche Anstieg stärker, mit  $k_1 = 11 [^\circ\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})]$  reproduzieren wir den Kurvenverlauf recht gut. Die Zeitkonstanten und  $k_2$  können näherungsweise belassen werden. Wir nehmen an, dass der steile Anstieg nach 6 Minuten nur durch das Nachrutschen von Holz verursacht wird und als Störung zu betrachten ist.



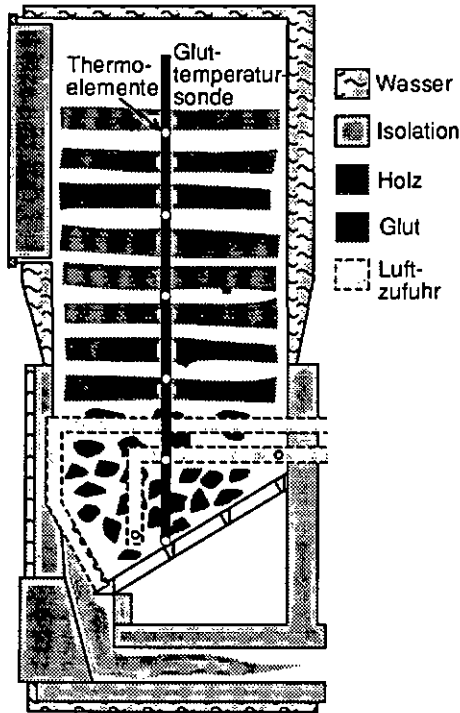
Figur 6.10 Gemessene (ausgezogene Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Schrittantwort der Flammentemperatur auf eine Primärluftzerhöhung von  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dieser Versuch wurde mit Tannenholz mit 15.8 % Feuchtigkeit durchgeführt.

Im weiteren werden wir die Konstanten aus den Versuch mit Buchenholz verwenden. Das Modell der Reaktion von Tannenholz wird uns am Schluss als Testfall zur Kontrolle der Robustheit unseres Reglers dienen.

### 6.4.1 Messung der Geschwindigkeit des Glutwachstums

Zur Verifizierung unserer Annahmen über das Glutwachstum haben wir folgendes Experiment durchgeführt:

Eine Temperatursonde, bestückt mit 7 Thermoelementen, wurde in den Füllschacht unserer Feuerung montiert. In Figur 6.11 ist die Platzierung der Sonde dargestellt. Mit dieser Sonde wurde ein Temperaturprofil der Glut während schrittweiser Änderungen der Primärluftzufuhr gemessen. Dieses Profil zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen in verschiedenen Höhen im Glutbett und im darüberliegenden Füllschacht.

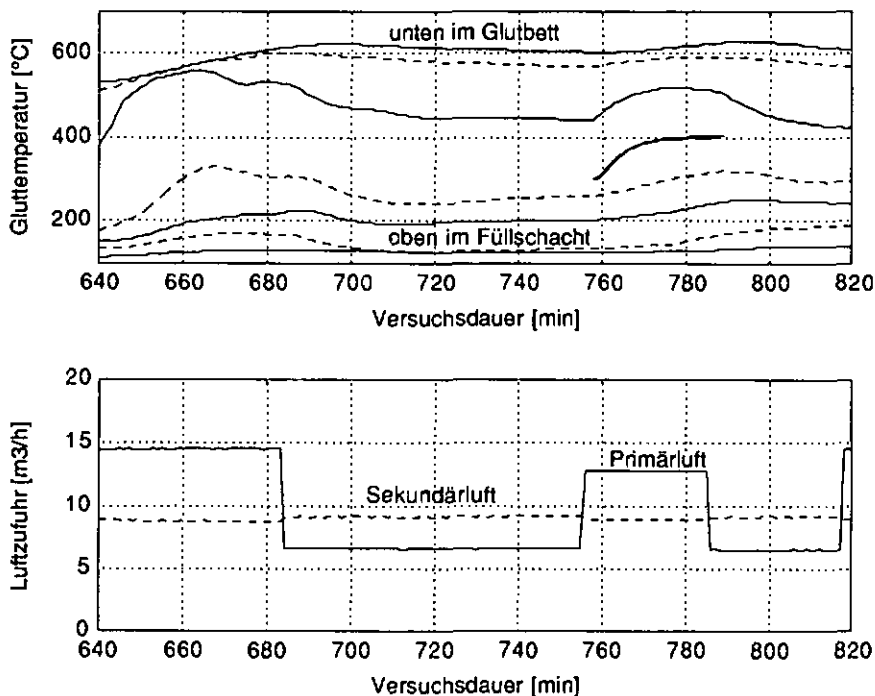


Figur 6.11: Schema zur Platzierung der Gluttemperatursonde in der Feuerung

Der zeitliche Verlauf des Wachsens und Schrumpfens der Glut ist anhand der Temperaturkurven ablesbar: Bei Temperaturen über 400 °C wird das Holz bereits vergast; bei Temperaturen unter 200 °C wird es vorwiegend getrocknet. Leider stört die Sonde das Nachrutschen des Holzes; während den Messungen entstand

## 6 Modellierung der Feuerung

deshalb oft ein einseitiges Glutbett. Dies beeinflusst jedoch vor allem die Höhe des Glutbettes und weniger dessen Temperaturen; die Reaktionsgeschwindigkeit sollte dadurch auch nicht zu sehr gestört werden. Figur 6.12 zeigt einen ausgewählten Temperaturverlauf.



Figur 6.12: Reaktion der Temperatur auf verschiedener Höhe in der Glut bei Primärluftveränderungen. Zum Vergleich zeigt die dicke Linie in der oberen Graphik die Schrittantwort eines Systems 2. Ordnung mit den Zeitkonstanten 100 s und 300 s.

Weil ein grosser Temperaturanstieg sicher auch einen hohen Zuwachs der Holzgasproduktion bedeutet, ist die Kurve mit dem grössten Temperaturanstieg für die Bestimmung der Zeitkonstante des Glutwachstums an wichtigsten. Deshalb zeigt die obere Graphik zum Vergleich die Schrittantwort eines simulierten Systems 2. Ordnung mit den Zeitkonstanten 100 s und 300 s (dicke Linie). Die Kurve mit dem grössten Temperaturanstieg wird durch diese Vergleichskurve gut approximiert. Die Wahl unserer Zeitkonstanten wird dadurch bestätigt.

## 7 Verbrennungsregelung

---

### 7.1 Flammentemperatur

Im letzten Kapitel haben wir gezeigt, dass die Primärluft als Stellgröße zur Regelung der Flammentemperatur dienen kann. Jetzt müssen wir noch die optimale Flammentemperatur für eine gute Verbrennung bestimmen. Experimente mit verschiedenen Holzarten, Holzfeuchtigkeiten und Feuerungsleistungen zeigten, dass die Flammentemperatur den Betriebsbedingungen angepasst werden muss. Auch während eines Abbrandzyklus ist die optimale Flammentemperatur noch Schwankungen unterworfen. Wir betrachten daher zuerst die Ursachen für Änderungen der Flammentemperatur während eines Abbrandes und anschließend die Unterschiede zwischen verschiedenen Abbrandversuchen. Während eines Abbrandzyklus beeinflussen vor allem die *Energieverteilung in der Feuerung* sowie die *Transformation der Holzzusammensetzung* die Flammentemperatur.

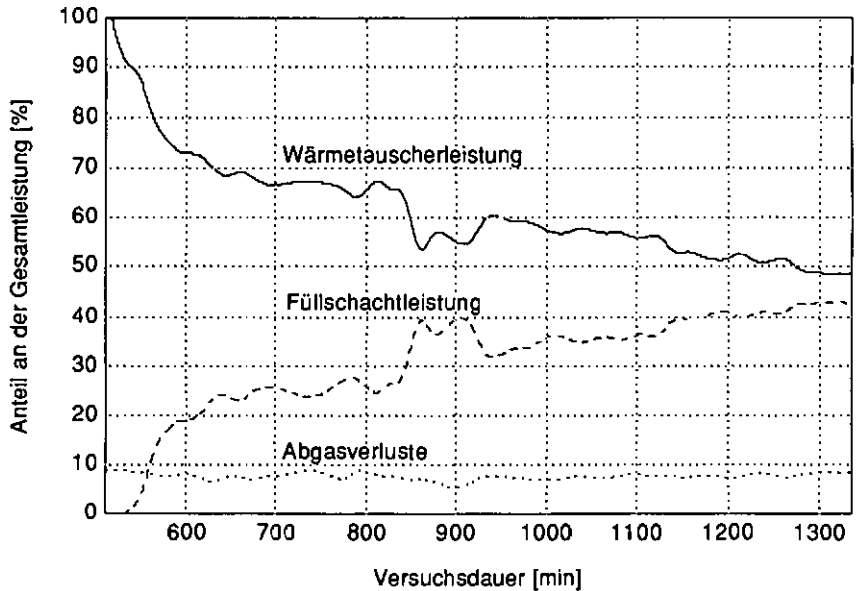
#### 7.1.1 Verlauf der Energieverteilung

Der Anteil der produzierten Energie, welcher auf dem Weg bis zur Flammentemperaturmessung noch in den Verbrennungsgasen bleibt, hängt von der Energieverteilung in der Feuerung ab. In Kapitel 5.5 haben wir die über den ganzen Abbrand gemittelte Energieverteilung beschrieben. Hier interessiert uns aber der *zeitliche Verlauf* der Energieverteilung während eines Abbrandversuchs. Deshalb zeigen wir in Figur 7.1 die relativen Energiebeiträge von Wärmetauscher, Füllschacht und Abgasverlusten in Prozent der gesamten Energie (ohne die allgemeinen Wärmeverluste):

- Wir nehmen an, dass die allgemeinen Wärmeverluste im normalen Betriebszustand annähernd konstant bleiben, weil sie nur durch die Temperaturdifferenz zwischen der Feuerung und der Umgebung bestimmt werden. Die Temperatur der Feuerung bleibt konstant, wenn gleich viel Wärme erzeugt wie verbraucht wird, was das Ziel übergeordneter Leistungsregelung ist (siehe Kapitel 8). Eine kontinuierliche Messung dieser Energieverluste ist kaum möglich.
- Die Abgasverluste sind bei gleichbleibender Abgaszusammensetzung proportional zur Temperatur und Menge. Weil die Menge mit der erzeugten Energiemenge ansteigt, bleibt der Anteil der Abgasverluste annähernd konstant. (Falls der Wärmetauscher zu klein dimensioniert ist, kann der Temperaturanstieg bei steigender Abgasmenge nicht mehr vernachlässigt werden. Die Verluste steigen dann überproportional an.)

## 7 Verbrennungsregelung

---Der Verlauf der Wärmetauscher- und der Füllschachtleistung wurde direkt gemessen. Es ist klar zu erkennen, dass der Anteil des Füllschachtes an der gesamten Wärmezeugung stetig steigt. Je weniger Holz im Füllschacht liegt, desto besser zirkulieren die heißen Gase darin, und desto besser wird die Wärmeübertragung durch Strahlung von der Glut auf die Füllschachtwände. Während des Tracknungsprozesses absorbiert das Holz im Füllschacht viel Energie, deshalb bleibt die Füllschachtleistung gering. Direkt nach dem Auffüllen entzieht die Holzfüllung dem Füllschacht sogar Energie; die Leistung ist negativ.



Figur 7.1 Zeitlicher Verlauf der Leistungsanteile bei unserem Referenzversuch. Alle Werte sind auf die momentane Summe der drei Leistungen bezogen.

Der bis zur Flammentemperaturmessung verbleibende Anteil an der gesamten produzierten Energie entspricht der Wärmetauscherleistung plus den Abgasverlusten (siehe Kapitel 5.5). Weil der Anteil dieser Energie an der Gesamtleistung stetig abnimmt, können wir folgende Schlussfolgerung ziehen:

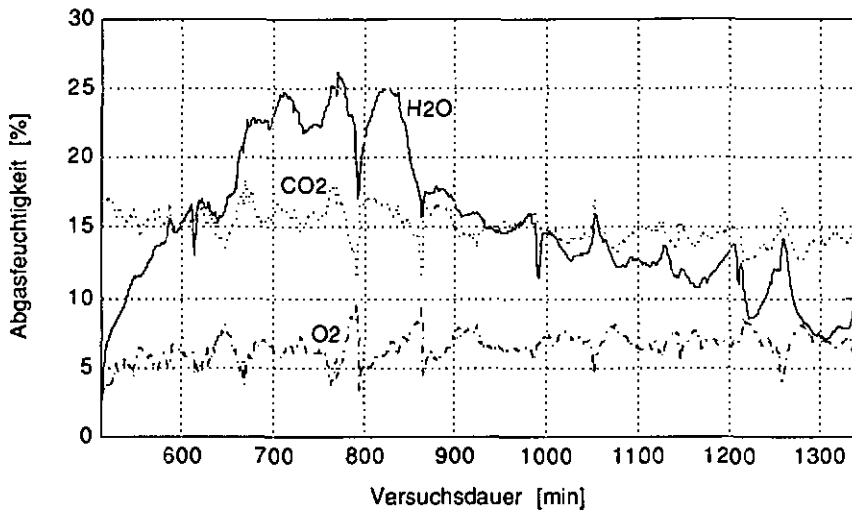
**Im Verlauf eines Abbrandes bewirkt der sinkende Anteil der Wärmetauscherleistung an der Gesamtleistung eine sinkende Flammentemperatur.**

### 7.1.2 Veränderung der Holzzusammensetzung

Die Holzzusammensetzung in der Feuerung verändert sich während des Abbrandes. Wir sehen anhand der gemessenen Abgaskonzentrationen, wie die Zusammensetzung des momentan verbrennenden Holzes aussieht. Figur 7.2 zeigt den Verlauf der mengenmässig wichtigsten Komponenten der Abgase, bezogen auf die trockene Abgasmenge. Die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Anteile bleiben recht konstant, der  $\text{H}_2\text{O}$ -Anteil hingegen steigt zuerst stark an, bevor er stetig abfällt.

---Nach dem Einfüllen von frischem Holz wird Energie zum Aufwärmen und Trocknen desselben verbraucht. (Abschätzung: Zwischen Minute 700 und 800 erhielten wir beim Referenzversuch maximal 13% Wasserdampf aus der Holzfeuchtigkeit. Bei  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  trockenen Abgasen und  $44 \text{ MJ}/\text{kmol}$  Verdampfungsenthalpie verbraucht die Trocknung also maximal  $1.4 \text{ kW}$  Leistung.)

---Bei fortgeschrittener Holztröcknung wird weniger Verdampfungswärme benötigt. Gegen Schluss des Abbrandes wird das verbleibende Holz teilweise entgast, und der steigende Kohlenstoffanteil erhöht den Heizwert des Brennstoffs.



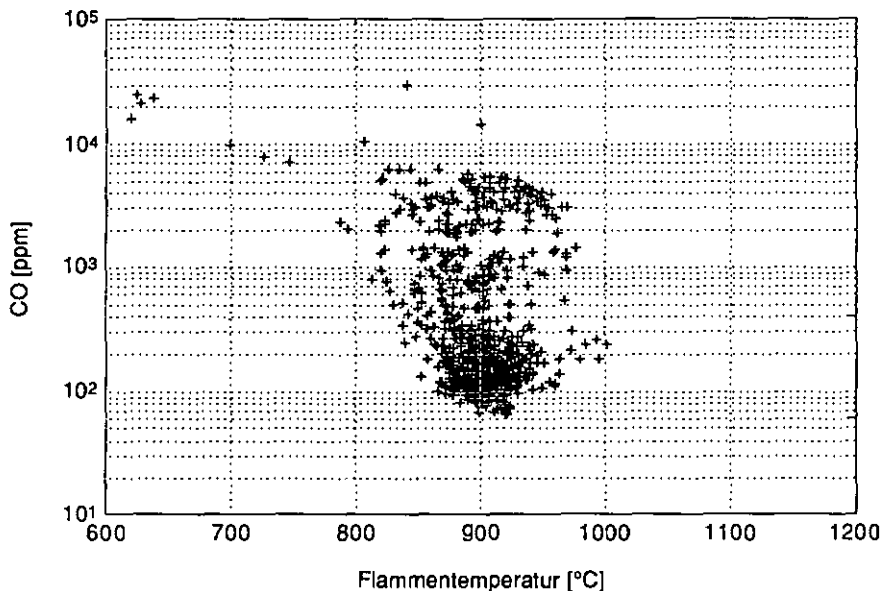
Figur 7.2 Verlauf der Gaskonzentrationen, bezogen auf die trockene Abgasmenge.

Aus der Transformation des Holzes folgt damit:

***In Verlauf eines Abbrandes bewirkt die Transformation von feuchtem Holz zu trockener Holzkohle eine steigende Flammentemperatur.***

### 7.1.3 Verlauf der Flammentemperatur

Die Einflüsse der Energieverteilung und der Holzzusammensetzung auf die Flammentemperatur heben sich weitgehend auf. Wenn wir die Schadstoffemissionen in Funktion der Flammentemperatur über einen ganzen Abbrand betrachten, stellen wir fest, dass die geringsten Emissionen immer bei der gleichen Flammentemperatur erreicht werden. In Figur 7.3 sehen wir direkt den Zusammenhang zwischen den Kohlenmonoxidemissionen und der Flammentemperatur. Alle Daten aus dem in Kapitel 5 beschriebenen Referenzversuch sind dargestellt. Bei 920 °C Flammentemperatur liegt ein deutliches Minimum für die CO-Emission. Offensichtlich ist es möglich, mit einer Regelung der Flammentemperatur auf 920 °C die Verbrennung über einen ganzen Abbrand im guten Bereich zu halten. Bei diesem Versuch war die Feuerungsleistung relativ gering (Sekundärluftmenge 12 m<sup>3</sup>/h) und es wurde Holz mit 20 % Feuchtigkeit verfeuert.



Figur 7.3 Kohlenmonoxidemission in Funktion der Flammentemperatur für Buchenholz mit 20 % Feuchtigkeit und einem Abbrand bei kleiner Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge 12 m<sup>3</sup>/h).

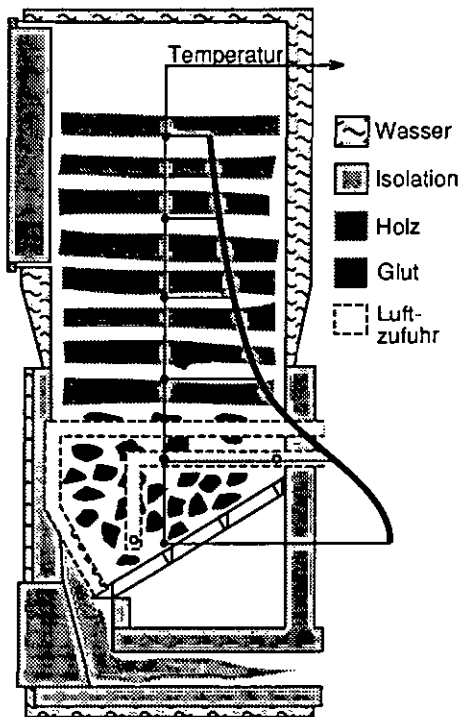
Zur Erklärung der Kompensation der beiden genannten Einflüsse zeigen wir in Figur 7.4 den Verlauf der Temperaturen zwischen Glut und Füllschacht. Der grösste

Temperaturgradient liegt direkt oberhalb der Glut. Dort ist das Holz völlig trocken und bereits teilweise entgast. Die Glut ist also durch eine wärmeisolierende, bis zum Ausbrand erhalten bleibende Schicht vom Holzvorrat getrennt. Die Temperatur im Füllschacht ist recht konstant und liegt nur wenig über dessen Wassertemperatur. Die Gluttemperatur liegt ebenfalls annähernd konstant bei etwa 600 °C.

**Die starren Randbedingungen beidseitig der stabilen isolierenden Schicht oberhalb der Glut bewirken eine annähernd konstante Wärmeabgabe der Glut während dem ganzen Abbrand.**

Nach dem Auffüllen absorbiert das frische Holz einen grossen Teil der Wärme aus der Glut für die Trocknung. Die Füllschachtleistung ist gering. Erst nach dem Trocknen des Holzvorrats steigt die Temperatur im Füllschacht geringfügig an, und die Füllschachtkühlung führt die Wärme aus der Glut ab.

**Bei konstanter Wärmeabgabe der Glut bleibt auch die Flammentemperatur konstant.**



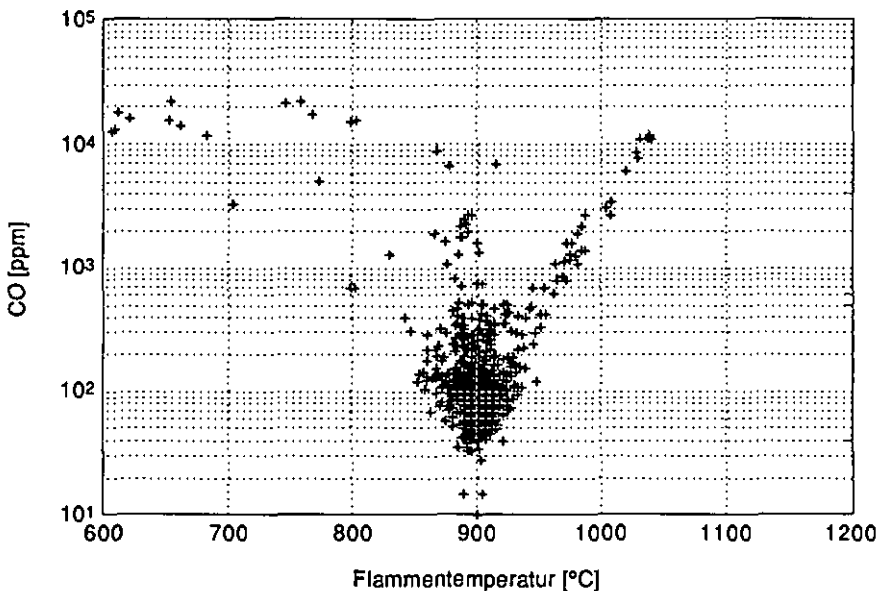
Figur 7.4 Verlauf der Temperatur von der Glut bis zum Füllschacht

### 7.1.4 Einfluss der Holzqualität auf die Flammentemperatur

Neben den oben beschriebenen Größen beeinflussen noch weitere Effekte die Flammentemperatur. Die Holzfeuchtigkeit bestimmt den Heizwert des Holzes und damit direkt die Flammentemperatur. Die Abhängigkeit der adiabaten Flammentemperatur von der Holzfeuchtigkeit geht aus Figur 3.1 hervor. Die theoretische Flammentemperatur bei  $\lambda = 1.4$  ändert sich um etwa  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei einer Erhöhung der Holzfeuchtigkeit von 20 % auf 30 %. Bei feuchtem Holz ist jedoch zu erwarten, dass während des Abbrandes die Tendenz aus Figur 7.2 verstärkt wird, dass also vor allem am Anfang nach dem Auffüllen mehr Energie zum Trocknen aufgewendet werden muss. Diese Energie vermindert die Wärmeabgabe an den Füllschacht, die gemessene Flammentemperatur wird nicht gesenkt.

**Wenn das Holz die Glut erreicht, ist es bereits vollständig getrocknet.**

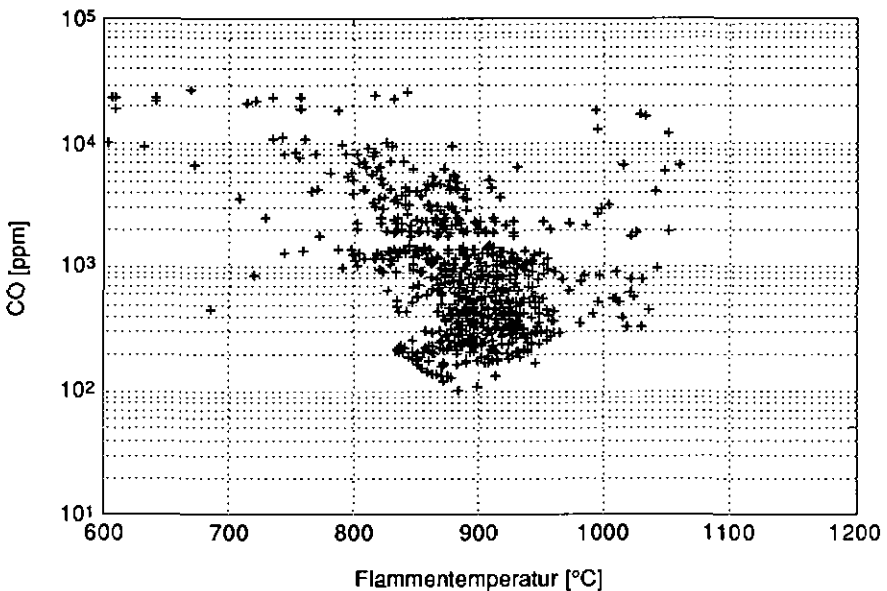
Eine Messung mit Buchenholz von 28 % Feuchtigkeit und bei kleiner Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge  $10\text{ m}^3/\text{h}$ ) ist in Figur 7.5 dargestellt. Diese Grafik zeigt ein ausgeprägtes Minimum der Emissionen bei einer Flammentemperatur von  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figur 7.5 Kohlenmonoxidemission in Funktion der Flammentemperatur für Buchenholz mit 28 % Feuchtigkeit und einem Abbrand bei kleiner Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge  $10\text{ m}^3/\text{h}$ ).

Offensichtlich ist bei feuchtem Holz die Einhaltung der optimalen Flammentemperatur noch wichtiger als bei trockenem Holz. Eine Anpassung des Flammentemperatursollwertes an die Holzfeuchtigkeit ist jedoch nicht notwendig.

Die Abhängigkeit des Heizwertes von der Holzart ist gering und kann hier sicher vernachlässigt werden. Versuche mit Tannenholz bestätigten diese Annahme. In Figur 7.6 sehen wir, dass bei kleiner Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ) für Tannen- wie für Buchenholz bei einer Flammentemperatur von  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  die Emissionen minimal sind.



Figur 7.6 Kohlenmonoxidemission in Funktion der Flammentemperatur für Tannenholz mit 17 % Feuchtigkeit und einem Abbrand bei kleiner Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

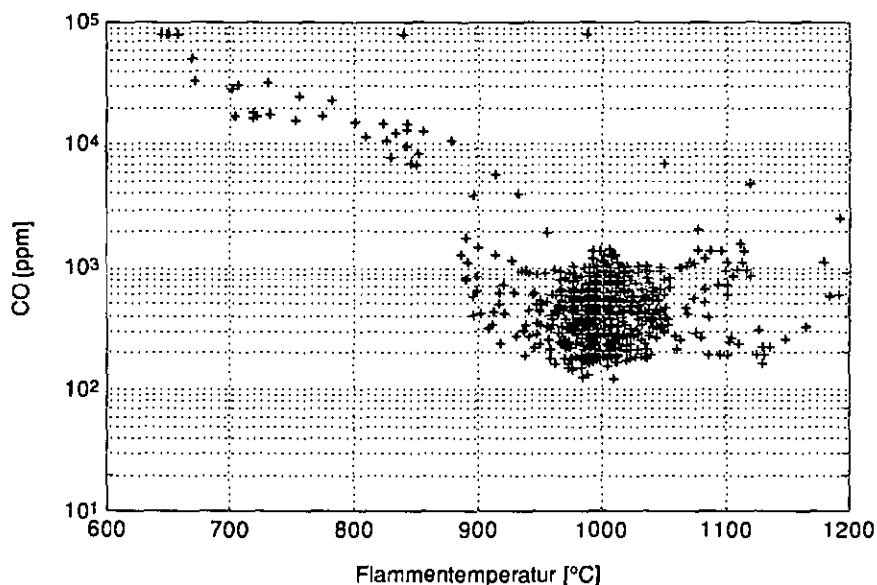
Hingegen beeinflusst die Feuerungsleistung die gemessene Flammentemperatur, indem sich die Wärmeverteilung, wie sie in Figur 5.2 skizziert ist, ändert. Die Leistung des Füllschachtes sowie die Ofenverluste bleiben ziemlich konstant. Bei höherer Leistung steigen vor allem die Leistung am Wärmetauscher und die Rauchgasverluste, und damit auch die Flammentemperatur. Deshalb ist es unumgänglich, den Sollwert leistungsabhängig zu führen. Der in Figur 7.7 dar-

## 7 Verbrennungsregelung

gestellte Versuch zeigt, dass bei hoher Leistung (Sekundärluftmenge  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ) eine Flammentemperatur von etwa  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  die geringsten Emissionen verspricht. Bei diesem Versuch verblieben 63 % der erzeugten Energie bis zur Temperaturmessung in den Verbrennungsgasen, im Gegensatz zu 55 % beim Referenzversuch mit  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  Sekundärluft. Die Verluste vor der Temperaturmessung betragen  $8.6 \text{ kW}$ , beim Referenzversuch waren es  $8.0 \text{ kW}$ .

Die in den Figuren 7.3 und 7.5 bis 7.7 gezeigten Messungen wurden mit einer Flammentemperaturregelung mit langsamer Abtastung durchgeführt. Die Streuung der Messwerte ist damit noch gross genug, um die Zusammenhänge zwischen Kohlenmonoxid und Flammentemperatur wiederzugeben.

*Als Resultat der vorliegenden Messungen erhalten wir, dass eine Regelung der Flammentemperatur auf einen nur leistungsabhängigen Sollwert von  $900\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$  eine gute Verbrennung über den ganzen Abbrand sicherstellen kann.*



Figur 7.7 Kohlenmonoxidemission in Funktion der Flammentemperatur für Buchenholz mit 16 % Feuchtigkeit und einem Abbrand bei hoher Feuerungsleistung (Sekundärluftmenge  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

### 7.1.5 Sollwert der Flammentemperatur

Wir wissen nun, dass die Flammentemperatur nur an die Leistung angepasst werden muss, um eine gute Verbrennung zu erreichen. Weil wir die Leistung nicht explizit messen wollen, müssen wir eine Ersatzgrösse suchen. Die Gesamtluftzufuhr bietet sich dafür an, weil über die Luftzufuhr bestimmt wird, wieviel Holz verbrannt wird. Da aber die Primärluft als ein Teil der Gesamtluftzufuhr die geregelte Grösse der Flammentemperaturregelung ist, darf diese nicht wieder zu Berechnung des Flammentempersollwertes herangezogen werden. Die geregelte Primärluft folgt jedoch in etwa der Sekundärluft, deshalb approximieren wir die Gesamtluftzufuhr durch die zweifache Sekundärluftzufuhr und verwenden somit einfach die Sekundärluft als Indikator für die Leistung.

Bei  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  Sekundärluftmenge hatten wir in Figur 7.4 und 7.5 die geringsten Emissionen bei  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Bei  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  erreichten wir in Figur 7.6 die geringsten Emissionen bei  $980 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aus einer linearen Interpolation folgt somit die folgende Formel für den Sollwert:

$$T_{F,\text{soll}} = T_O + \dot{V}_S \cdot T_K \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.1)$$

$T_{F,\text{soll}}$  = Flammentempersollwert

$T_O$  = Flammentempersollwertoffset =  $800 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_K$  = Flammentemperaturkorrekturfaktor =  $10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}^3/\text{h}}$

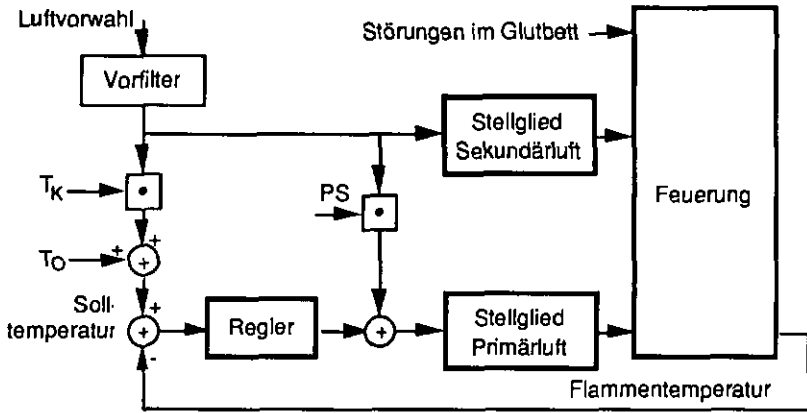
$\dot{V}_S$  = Sekundärluftmenge [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Damit können wir nun die Struktur der Flammentemperaturregelung festlegen. Wie Figur 7.8 zeigt, bestimmt die externe Heizungsregelung die Leistung der Feuerung über die Luftvorwahl. Damit die Luftvorwahl nicht abrupt verstellt werden kann, setzen wir ein Vorfilter ein. Dieses könnte zum Beispiel aus einem Verzögerungsglied erster Ordnung mit einer Zeitkonstanten von  $20 \text{ min}$  bestehen. Die Primärluft- und Sekundärluftvorwahl stehen im festen, feuerungsspezifischen Verhältnis  $PS$  zueinander. In unserer Feuerung ist  $PS = 1$ ; das heisst, dass im Normalfall die Primärluftmenge gleich der Sekundärluftmenge ist. Diesen Wert können wir aus unseren geregelten Versuchen ablesen. Für die Primärluft ergibt die Vorwahl einen Arbeitspunkt, um den herum geregelt wird.

Die Solltemperatur der Flamme wird nach Formel 7.1 eingestellt.

Die Störungen im Glutbett wirken direkt auf die Flammentemperatur, sowie auch auf den Zusammenhang Luftzufuhr-Flammentemperatur des Verbrennungsprozesses.

## 7 Verbrennungsregelung



Figur 7.6: Reglerstruktur. Die Luftvorwahl wird durch einen externen Heizungsregler gesteuert.  $T_K$ ,  $T_0$  und  $PS$  sind Konstanten.

### 7.2 Primärluftregelsystem

Bevor wir eine Regelung entwerfen, müssen wir die Dynamik der Flammentemperatur bei Primärluftveränderungen verstehen. Bereits im Kapitel 6 konnten wir zeigen, dass die Flammentemperaturreaktion inklusive Stellglied durch ein Modell 5. Ordnung approximiert werden kann. In Figur 6.9 haben wir die gemessene Schrittwantwort der simulierten gegenübergestellt. Die Zeitkonstanten wurden nur grob aus den experimentellen Beobachtungen abgeleitet. Deshalb sollten wir den Einfluss von Parametervariationen auf das Verhalten unseres Modells kennen.

#### 7.2.1 Sensitivitätsanalyse

Das Sprungverhalten eines dynamischen Systems kann sehr gut anhand der Pole und Nullstellen verstanden werden. Für die gewählten Parameter erhalten wir folgende Pole  $p_i$  und Nullstellen  $z_i$  unseres Systems:

$$\begin{aligned} p_1 &= -0.3333 & z_1 &= -0.00092 + 0.0161 i \\ p_2 &= -0.2000 & z_2 &= -0.00092 - 0.0161 i \\ p_3 &= -0.0200 & z_3 &= -0.01559 \\ p_4 &= -0.0100 \\ p_5 &= -0.0033 \end{aligned}$$

Wenn wir alle Zeitkonstanten um  $\pm 20\%$  variieren, so erhalten wir als extremste Grenzen für die Pole und Nullstellen folgende Werte:

(  $\text{Re}(z_i)$  ist der Realteil von  $z$ ;  $\text{Im}(z_i)$  ist der Imaginärteil von  $z$  )

$$\begin{array}{ll} -0.4167 \leq p_1 \leq -0.2778 & -0.0027 \leq \text{Re}(z_1) \leq -0.0000346 \\ -0.2500 \leq p_2 \leq -0.1667 & 0.0142 \leq \text{Im}(z_1) \leq 0.0215 \\ -0.0250 \leq p_3 \leq -0.0167 & -0.0027 \leq \text{Re}(z_2) \leq -0.0000346 \\ -0.0125 \leq p_4 \leq -0.0083 & -0.0215 \leq \text{Im}(z_2) \leq -0.0142 \\ -0.0042 \leq p_5 \leq -0.0028 & -0.0195 \leq z_3 \leq -0.0130 \end{array}$$

Daraus können wir die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Unser Modell ist trotz allen Parametervariationen *immer* stabil. Die Pole bleiben immer in der linken Hälfte der komplexen Ebene.
- Die Pole verschieben sich nur wenig; sie sind bestimmt durch:  $p_i = -T_i^{-1}$ .
- Die Nullstelle  $z_3$  sowie auch die Imaginärteile der Nullstellen von  $z_1$  und  $z_2$  verschieben sich ebenfalls nur wenig.
- Einzig die Realteile der Nullstellen von  $z_1$  und  $z_2$  weisen grössere Variationen auf. In einem geschlossenen Regelkreis haben diese nur dann einen Einfluss, wenn der proportionale Verstärkungsfaktor sehr gross gewählt wird. Denn nähern sich die Pole des Regelkreises den Nullstellen.

Weil keiner der Pole bei der Variation der Zeitkonstanten droht, die imaginäre Achse zu überschreiten, ist unser Modell also unkritisch in Bezug auf die Wahl der Zeitkonstanten.

### 7.2.2 Wahl der Regelung

Die am häufigsten eingesetzten Prozessregler stammen aus der Familie der PID-Regler. PID bedeutet Proportional-Integral-Differential; d. h. diese Regler sind aus drei parallelen Elementen aufgebaut. Oftmals wird der Integral- oder der Differentialanteil weggelassen. In unserem Fall können wir aus zwei Gründen auf den Differentialanteil verzichten: Erstens stellen wir keine sehr hohen Anforderungen an die Regelgeschwindigkeit, und zweitens reagieren Differentialregler empfindlich auf Störungen. Weil wir ohne Differentialanteil eine genügende Regelgüte erreichen, beschränken wir uns auf die Wahl zwischen einem reinen Proportionalregler und einem PI-Regler. (Für Fragen der Regeltheorie siehe [27].)

-- Die Übertragungsfunktion des P-Reglers ist  $G_R = k_P$

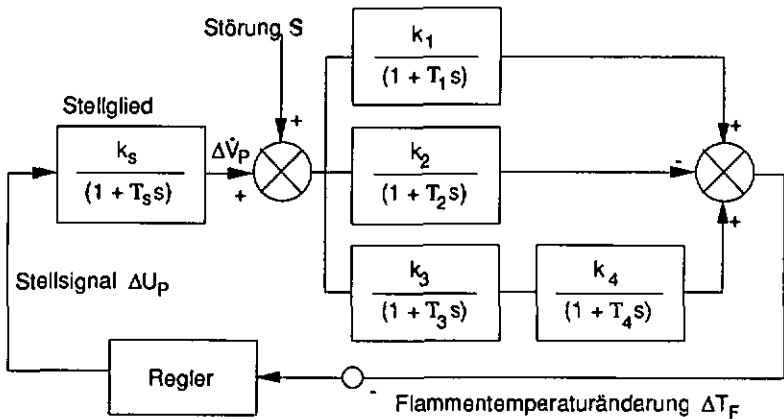
-- Die Übertragungsfunktion des PI-Reglers ist  $G_R = k_P \frac{1 + T_I s}{T_I s}$

$k_P$  = Proportionalkonstante;  $T_I$  = Integrationszeitkonstante oder Nachstellzeit

## 7 Verbrennungsregelung

Als Gütekriterium für die Wahl des Reglers wählen wir die Störungsunterdrückung, welche das oberste Ziel unserer Regelung ist. Je kleiner die Schwankungen der Flammentemperatur, desto geringer werden die Emissionen. Das Verhalten des Regelkreises bei Sollwertänderungen ist zweitrangig, weil der Sollwert nur sehr langsam verstellt werden muss.

Die Störungen der Verbrennung treten in der Glut auf, sie äussern sich durch eine veränderte Produktion von brennbaren Gasen, z. B. bei einer Brückenbildung oder beim Nachrutschen von Holz. Zur Simulation der Störungen verwenden wir als Approximation schrittförmige Störungen der Primärluftzufuhr, welche auch die Gasproduktion beeinflussen. Wichtig ist, dass solche Vorgänge nicht zu einer dauerhaften Verschiebung der Flammentemperatur und damit zu höheren Emissionen führen. Figur 7.9 zeigt das Blockdiagramm des geschlossenen Regelkreises mit dem Störungsmodell.



Figur 7.9 Blockdiagramm des geschlossenen Regelkreises mit Störungseinfluss.

Aus dem Blockdiagramm in Figur 7.9 lesen wir ab:

$$\Delta T_F = G_F (S - G_S G_R \Delta T_F)$$

$G_S$ ,  $G_F$  sind die Übertragungsfunktionen von Stellglied und Feuerung.  
 $S$  ist die Störung.

Die Störungsübertragungsfunktion  $G_{Stör}$  lautet somit:

$$G_{Stör} = \frac{\Delta T_F}{S} = \frac{G_F}{1 + G_S G_F G_R}$$

$$= \frac{f_5 s^5 + f_4 s^4 + f_3 s^3 + f_2 s^2 + f_1 s + f_0}{l_6 s^6 + l_5 s^5 + l_4 s^4 + l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s + l_0}$$

Mit den Definitionen der  $d_j$  und  $e_i$  in Kapitel 6.4 ergibt sich für den:

P-Regler	PI-Regler
$f_5 = 0$	$f_5 = T_S T_I e_3$
$f_4 = T_S e_3$	$f_4 = T_S T_I e_2 + T_I e_3$
$f_3 = T_S e_2 + e_3$	$f_3 = T_S T_I e_1 + T_I e_2$
$f_2 = T_S e_1 + e_2$	$f_2 = T_S T_I e_0 + T_I e_1$
$f_1 = T_S e_0 + e_1$	$f_1 = T_I e_0$
$f_0 = e_0$	$f_0 = 0$
$l_6 = 0$	$l_6 = T_S T_I d_4$
$l_5 = T_S d_4$	$l_5 = T_S T_I d_3 + T_I d_4$
$l_4 = T_S d_3 + d_4$	$l_4 = T_S T_I d_2 + T_I d_3 + k_{pK_S} T_I e_3$
$l_3 = T_S d_2 + d_3 + k_{pK_S} e_3$	$l_3 = T_S T_I d_1 + T_I d_2 + k_{pK_S} T_I e_2 + k_{pK_S} e_3$
$l_2 = T_S d_1 + d_2 + k_{pK_S} e_2$	$l_2 = T_S T_I d_0 + T_I d_1 + k_{pK_S} T_I e_1 + k_{pK_S} e_2$
$l_1 = T_S d_0 + d_1 + k_{pK_S} e_1$	$l_1 = T_I d_0 + k_{pK_S} T_I e_0 + k_{pK_S} e_1$
$l_0 = d_0 + k_{pK_S} e_0$	$l_0 = k_{pK_S} e_0$

Die Schrittantworten der Störungsübertragungsfunktionen helfen uns bei der Wahl des Reglers. In Figur 7.10 sind Schrittantworten für den P-Regler mit Proportional-konstanten zwischen 0.1 und 1 aufgetragen. Für die bleibende Regelabweichung nach einer Schrittfunktion erhalten wir nach dem Grenzwertsatz der Laplace-Transformation [27]:

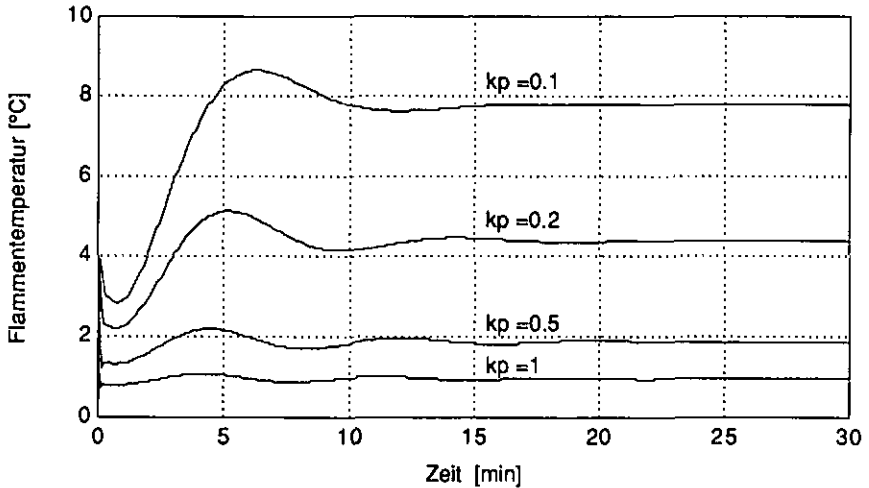
$$\lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{1}{s} s G_{Stör}(s) \right) = \frac{f_0}{l_0} = \frac{e_0}{d_0 + k_{pK_S} e_0}$$

$$= \frac{k_1 - k_2 + k_3 k_4}{1 + k_{pK_S} (k_1 - k_2 + k_3 k_4)} = \frac{34.64}{1 + k_{pK_S} 34.64}$$

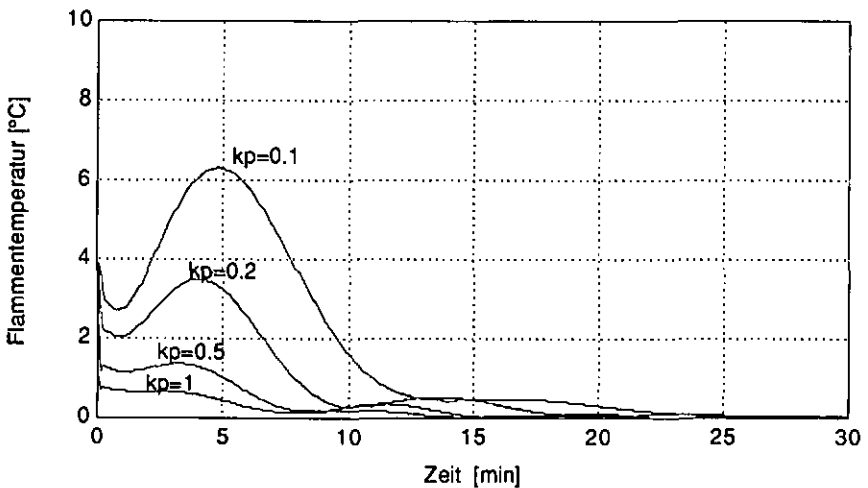
In Figur 7.11 sehen wir die entsprechenden Schrittantworten für den PI-Regler mit  $T_I = 300$  s. Bei kleinerem Überschwingen geht die bleibende Regelabweichung hier offensichtlich gegen Null ( $f_0 = 0$ ). Die Integrationszeitkonstante  $T_I$  haben wir hier wie oft üblich gleich der grössten Systemzeitkonstanten gewählt.

## 7 Verbrennungsregelung

**Wir wählen deshalb den PI-Regler.**



Figur 7.10 Schrittantwort der Störungsübertragungsfunktion der Feuerung mit verschiedenen Proportionalkonstanten  $k_p$  des P-Reglers.



Figur 7.11 Schrittantwort der Störungsübertragungsfunktion der Feuerung mit verschiedenen Proportionalkonstanten  $k_p$  des PI-Reglers. Die Integrationszeitkonstante  $T_I$  beträgt hier 300 Sekunden.

### 7.2.3 Wahl der Reglerparameter

Wie wir in Kapitel 7.2.1 bereits gesehen haben, ist das Modell der Feuerung (aus Figur 6.8) immer stabil. Daraus folgt für unseren geschlossenen Regelkreis, dass die Regelgüte mit zunehmender Proportionalkonstante besser wird. Unser Stellglied setzt der Regelgeschwindigkeit jedoch Grenzen. Wir untersuchen deshalb die Schrittantwort der Primärluft unter Störungseinfluss. Aus Figur 7.9 lesen wir ab:

$$\Delta \dot{V}_P = -G_F G_S G_R (S + \Delta \dot{V}_P)$$

Die Übertragungsfunktion der Störung zur Primärluft  $G_P$  lautet somit:

$$\begin{aligned} G_P &= \frac{\Delta \dot{V}_P}{S} = - \frac{G_S G_F G_R}{1 + G_S G_F G_R} \\ &= - \frac{w_4 s^4 + w_3 s^3 + w_2 s^2 + w_1 s + w_0}{l_6 s^6 + l_5 s^5 + l_4 s^4 + l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s + l_0} \end{aligned}$$

Die Nennerkoeffizienten  $l_i$  bleiben gleich wie bei der Störungsübertragungsfunktion, die Zählerkoeffizienten  $w_i$  sind neu:

$$w_4 = k p k_S T_{j\theta 3}$$

$$w_3 = k p k_S T_{j\theta 2} + k p k_S e_3$$

$$w_2 = k p k_S T_{j\theta 1} + k p k_S e_2$$

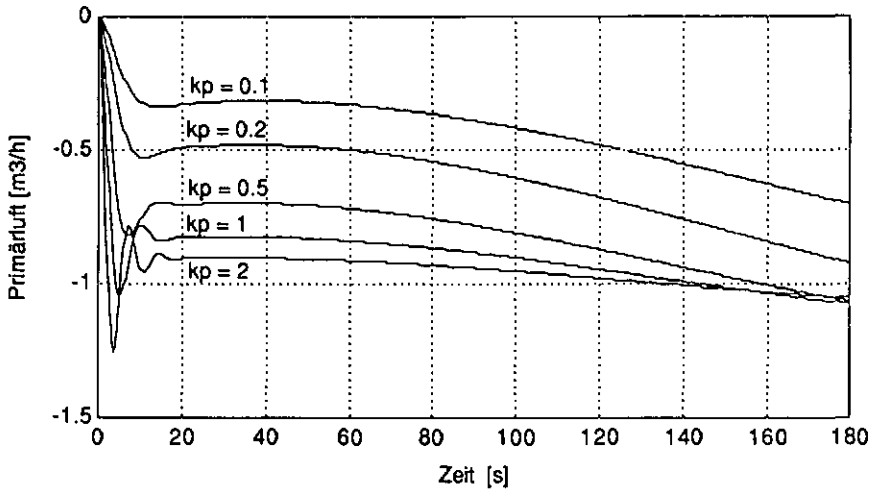
$$w_1 = k p k_S T_{j\theta 0} + k p k_S e_1$$

$$w_0 = k p k_S e_0$$

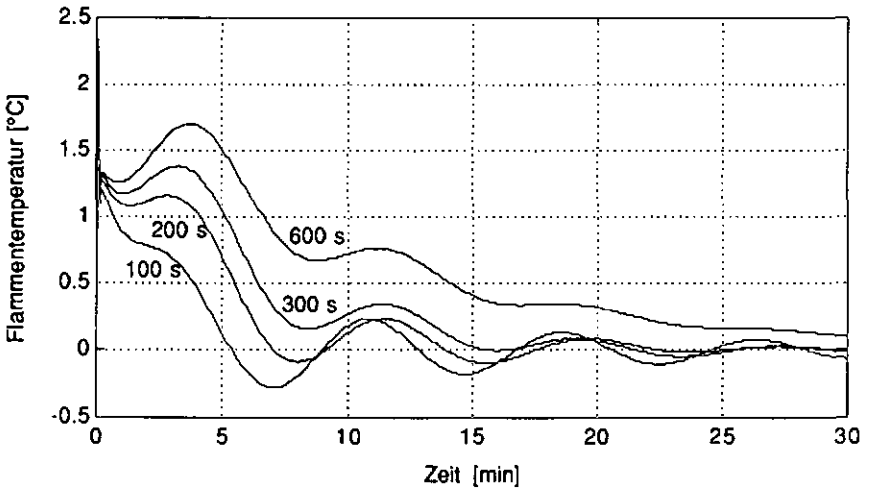
Figur 7.12 zeigt die ersten 180 s der Schrittantwort der Primärluft. Beim Betrachten der Schrittantwort stellen wir fest, dass sich beim Erhöhen der Proportionalkonstante  $k_p$  das Überschwingen verstärkt. Weil wir bereits mit  $k_p = 0.5$  eine befriedigende Regelgüte in unserer Simulation erreichen, beschränken wir uns deshalb auf diese Proportionalkonstante. Damit erhöhen wir die Lebensdauer unseres Stellgliedes.

Eine Faustregel der Regelungstechnik besagt, dass die Integrationszeitkonstante im Allgemeinen gleich der grössten Zeitkonstante des zu regelnden Systems gewählt werden soll. Die Kürzung des dadurch verursachten Poles in der Übertragungsfunktion gibt die besten Ergebnisse. In Figur 7.13 zeigen wir zum Vergleich die Störungsschrittantworten mit verschiedenen Integrationszeitkonstanten des Reglers. Wie erwartet ist das Einschwingverhalten bei einer Integrationszeitkonstante von 300 s am besten.

## 7 Verbrennungsregelung



Figur 7.12 180 Sekunden der Schrittantwort der Primärluft nach einer schrittförmigen Störung von  $1\text{m}^3/\text{h}$  bei verschiedenen Proportionalkonstanten  $k_p$ . ( $T_I = 300\text{s}$ )



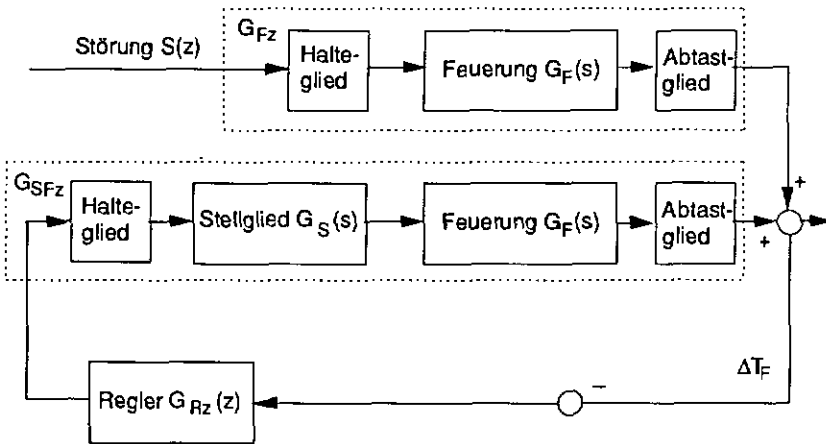
Figur 7.13 Schrittantworten der Störungsübertragungsfunktion für Integrationszeitkonstanten  $T_I$  von 100, 200, 300 und 600s und der Proportionalkonstante  $k_p=0.5$ .

**Damit haben wir einen PI-Regler mit einer Proportionalkonstanten von 0.5 und einer Integrationszeitkonstanten von 300 s gewählt.**

### 7.3 Zeitdiskretes Modell

Die Regelung für unsere Feuerung soll von einem Mikroprozessorsystem ausgeführt werden. Ein solches System ist für die sequentielle Steuerung der Feuerung sowieso notwendig und kann dann leicht auch die Flammentemperaturregelung übernehmen. Weil ein Mikroprozessor jedoch nicht kontinuierlich arbeitet, muss unser regeltechnisches Modell erweitert und umgeformt werden. Wir ergänzen das Blockmodell in Figur 7.9 durch ein Abtastglied vor und ein Halteglied nach unserem neuen digitalen Regler. Das Abtastglied, ein Analog-Digital-Wandler, führt dem Regler in festen Zeitintervallen  $T_A$  (der Abtastzeit) die gemessene Flammentemperatur zu. Das Halteglied nullter Ordnung hält die vom Regler ausgegebene Stellgröße bis zum nächsten Schritt konstant. Dies besorgt unser Digital-Analog-Wandler.

Weil wir das ganze Modell zeitdiskret betrachten möchten, lassen wir die z-Transformierte der Störung auf unser System einwirken. Wir verschieben den Angriffspunkt der Störung; deshalb müssen wir die Störung mit der Feuerungsübertragungsfunktion filtern. Dadurch erhalten wir wieder den gleichen Störeinfluss wie zuvor. Zum Übergang auf die kontinuierliche Feuerung führen wir wieder Halte- und Abtastglieder ein. Das neue Blockmodell zeigen wir in Figur 7.14.



Figur 7.14 Zeitdiskretes Blockschaltbild der Störungsübertragungsfunktion.

Zur Berechnung der Störungsübertragungsfunktion bedienen wir uns dem diskreten Äquivalent zur Laplace-Transformation, der z-Transformation. Die

## 7 Verbrennungsregelung

z-Übertragungsfunktion  $G_z(z)$  erhalten wir aus der s-Übertragungsfunktion  $G(s)$  inklusive den Abtast- und Haltegliedern nach folgender Beziehung (siehe [27]):

$$G_z(z) = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left( \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{G(s)}{s} \right) \right)$$

$\mathcal{Z}$  bezeichnet die z-Transformation und  $\mathcal{L}^{-1}$  die inverse Laplace-Transformation.

Die z-Transformierte der Feuerungsübertragungsfunktion mit Halte-, aber *ohne* Stellglied ergibt sich zu:

$$G_{Fz}(z) = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left( \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s} \left( \frac{k_1}{1+T_1s} + \frac{k_2}{1+T_2s} + \frac{k_3k_4}{(1+T_3s)(1+T_4s)} \right) \right) \right)$$

Die z-Transformierte der Feuerungsübertragungsfunktion mit Halte- und *mit* Stellglied ergibt sich zu:

$$G_{SFz}(z) = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left( \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s} \left( \frac{k_s}{1+T_s s} \right) \left( \frac{k_1}{1+T_1s} + \frac{k_2}{1+T_2s} + \frac{k_3k_4}{(1+T_3s)(1+T_4s)} \right) \right) \right)$$

Die Übertragungsfunktionen ohne und mit Stellglied  $G_F(s)$  und  $G_S(s)G_F(s)$  werden zur Berechnung von  $G_{Fz}(z)$  und  $G_{SFz}(z)$  in Partialbrüche zerlegt und die Partialbrüche direkt transformiert. Dabei gilt nach der Übersetzungstabelle in [27]:

$$\mathcal{Z} \left( \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{c}{s(s+c)} \right) \right) = \frac{(1 - e^{-cT_A}) z}{(z-1)(z - e^{-cT_A})}$$

dabei ist  $T_A$  die Abtastzeit,  $c$  ist eine beliebige Konstante.

Wenn wir die Integration nach der Trapezregel approximieren, erhalten wir für die z-Übertragungsfunktion  $G_{Rz}$  des PI-Reglers [27]:

$$G_{Rz} = k_P \left( 1 + \frac{T_A}{2T_I} \frac{z+1}{z-1} \right) = \frac{k_P \left( \frac{T_A}{2T_I} + 1 \right) + k_P \left( \frac{T_A}{2T_I} - 1 \right) z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (7.2)$$

Aus Figur 7.14 leiten wir ab:

$$\Delta T_F = S G_{Fz} - \Delta T_F G_{Rz} G_{SFz}$$

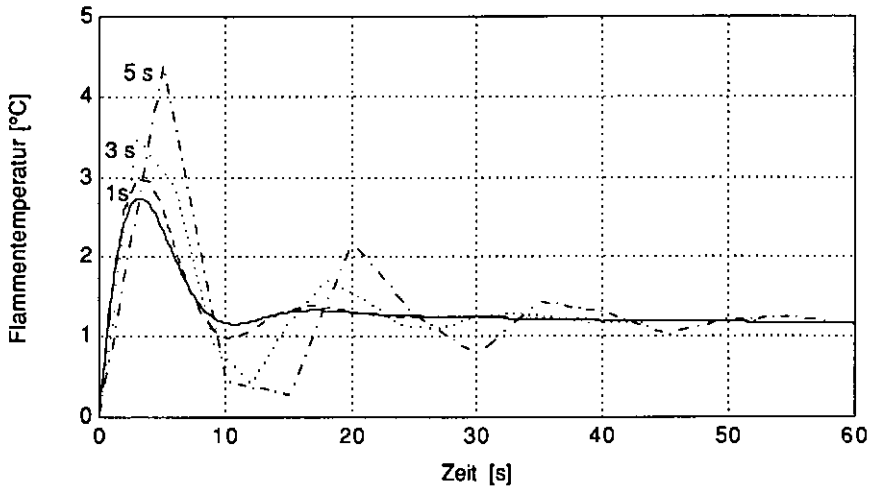
Und daraus berechnen wir die Störungsübertragungsfunktion  $G_{Stör,z}$ :

$$G_{Stör,z} = \frac{\Delta T_F}{S} = \frac{G_{Fz}}{1 + G_{Rz} G_{SFz}}$$

Die Schrittantwort dieser z-Übertragungsfunktion ist von der Abtastzeit abhängig.

Für den Regler wurden die gewählten Parameter  $T_I = 300$  s und  $k_P = 0.5$  beibehalten. Figur 7.15 zeigt die ersten 60 Sekunden dieser Schrittantwort für drei

verschiedene Abtastzeiten  $T_A$ . Daneben ist zum Vergleich auch noch die kontinuierliche Schrittantwort aufgezeichnet.



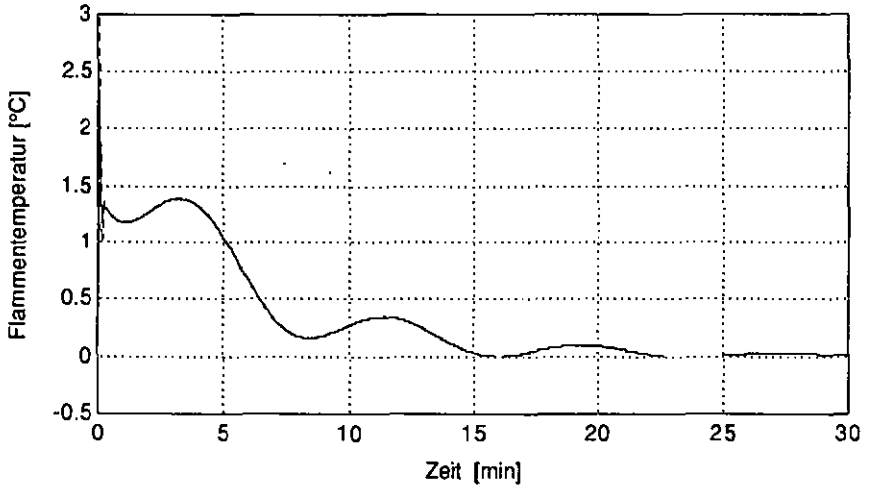
Figur 7.15 Gegenüberstellung der kontinuierlichen (ausgezogene Linie) und zeitdiskreten Schrittantworten der Störungsübertragungsfunktion mit Abtastzeiten  $T_A$  von 1, 3 und 5 s.

Es ist deutlich zu sehen, dass eine Abtastzeit von 5 s bereits relativ schlechte Resultate liefert; eine Regelung mit 1 s Abtastzeit die kontinuierliche Regelung jedoch sehr gut approximiert.

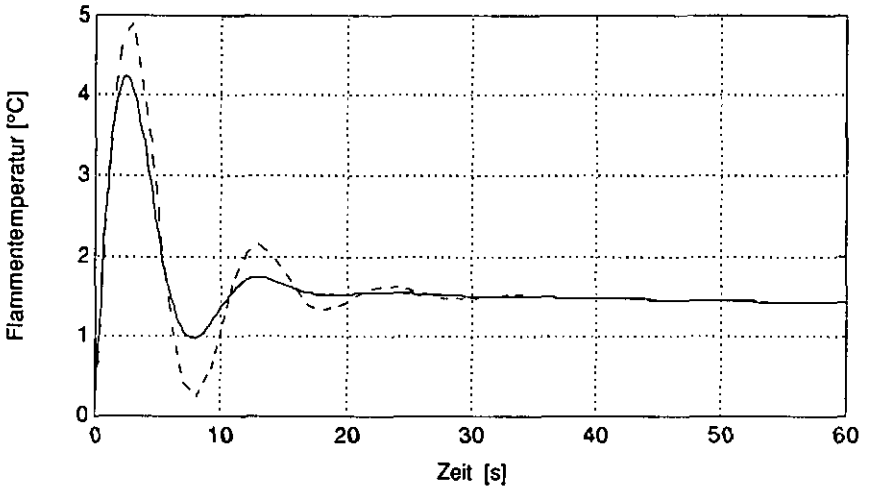
**Bei einer Abtastzeit von 1 s wird die kontinuierliche Regelung gut approximiert.**

Zum Vergleich zeigen wir in Figur 7.16 noch einen längeren Zeitabschnitt der Schrittantwort des kontinuierlichen und des abgetasteten Reglers. Ausser in den ersten Sekunden unterscheiden sich die beiden Kurven offensichtlich nicht mehr. Zur Kontrolle der Robustheit unseres Reglers testen wir ihn nun noch an unserem Modell, das wir aus der Schrittantwort von Tannenholz gewonnen haben. Dazu brauchen wir nur die Konstanten  $k_1$  und  $k_3$   $k_4$  auf 11 bzw. 55  $^{\circ}\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})$  zu ändern. Die ersten 60 Sekunden der resultierenden Schrittantwort zeigt Figur 7.17, auch hier zusammen mit der kontinuierlichen Funktion. Offensichtlich ist die Antwort nur unwesentlich schlechter. Damit haben wir gezeigt, dass die Regelung auch mit Tannenholz gut funktionieren wird.

## 7 Verbrennungsregelung



Figur 7.16 Gegenüberstellung der kontinuierlichen und diskreten Schrittantwort der Störungsübertragungsfunktion (Abtastzeit  $T_A = 1$  s). Bereits nach wenigen Sekunden unterscheiden sich die beiden Kurven nicht mehr voneinander.



Figur 7.17 Gegenüberstellung der kontinuierlichen (ausgezogene Linie) und diskreten Schrittantwort der Störungsübertragungsfunktion (Abtastzeit  $T_A = 1$  s). Hier wurden die Konstanten aus der Schrittantwort von Tennenholz verwendet.

### 7.3.1 Regelalgorithmus

Aus der z-Übertragungsfunktion des PI-Reglers in Gleichung (7.2) erhalten wir durch inverse z-Transformation direkt die Differenzengleichung:

$$U_P(k) = k_P \left( \frac{T_A}{2T_I} + 1 \right) T_e(k) + k_P \left( \frac{T_A}{2T_I} - 1 \right) T_e(k-1) + U_P(k-1) \quad (7.3)$$

$U_P(k)$  = Stellgrösse zur Zeit  $k T_A$  (Primärluftstellsignal)

$U_P(k-1)$  = Stellgrösse zur Zeit  $(k-1) T_A$  ;

$T_e(k)$  = Regelabweichung zur Zeit  $k T_A$

$T_e(k-1)$  = Regelabweichung zur Zeit  $(k-1) T_A$ ;

$k_P$  = Proportionalitätskonstante

$T_I$  = Integrationszeitkonstante

$T_A$  = Abtastzeit

Der im Mikroprozessorsystem im Sekundentakt zu realisierende Algorithmus lautet also folgendermassen:

1. Messung der Flammentemperatur  $T_F(k)$
2. Berechnung des Sollwertes  $T_{F,soll}$  nach Formel 7.1 aus der aktuellen Sekundärluftzufuhr  $\dot{V}_S$ :  $T_{F,soll}(k) = T_O + \dot{V}_S(k) \cdot T_K$
3. Regelabweichung  $T_e(k) = T_{F,soll}(k) - T_F(k)$
4. Berechnung des Integralanteils  $I = k_P \frac{T_A}{2T_I} (T_e(k) + T_e(k-1))$
5. Neue Stellgrösse  $U_P(k) = I + k_P (T_e(k) - T_e(k-1)) + U_P(k-1)$
6. Daten umspeichern:  $T_e(k-1) := T_e(k)$ ;  $U_P(k-1) := U_P(k)$
7. Wenn nötig: Stellgrösse begrenzen
8. Stellgrösse ausgeben

Schritt 4 ist nur dann auszuführen, wenn die Stellgrösse nicht physikalisch begrenzt ist, das heisst wenn das Stellglied die Stellgrösse noch ausführen kann. Sonst integrieren wir den Regelfehler bei Sättigung im schlimmsten Fall bis zum Überlauf der Rechnerarithmetik. Auch sonst müsste zuerst der integrierte Fehler abgebaut werden, wenn der Regelfehler nach längerer Zeit der Stellsignal-sättigung wieder gegen Null geht. Dies wäre regeltechnisch sinnlos. Bei Sättigung des Stellglieds setzen wir den Integralanteil deshalb einfach gleich Null.

### 7.4 Verbrennungsqualität der geregelten Feuerung

Bereits vor der Modellierung der Feuerung und der Simulation der Regelung haben wir Versuche mit einer PI-Regelung durchgeführt. Wir hatten die Regelparameter durch Ausprobieren bestimmt. Als Abtastzeit wurde das Massintervall der Datenaquisition verwendet. Die gewählten Parameter waren: Abtastzeit  $T_A = 60$  s; Proportionalkonstante  $k_p = 0.05$ ; Integrationszeitkonstante  $T_I = 600$  s. Der Flammentemperatursollwert wurde je nach Versuch fest auf einen Wert zwischen  $870^\circ\text{C}$  und  $950^\circ\text{C}$  eingestellt.

Die Testmessungen in Kapitel 5 wurden mit diesen Regelparametern durchgeführt, ebenso die Messungen zur Bestimmung des optimalen Sollwertes für die Flammentemperatur am Anfang dieses Kapitels. Bereits diese sehr vorsichtige Regelung (die Proportionalkonstante war zehn mal kleiner als die aufgrund der Simulation gewählt) erreichte, dass vor allem das Langzeitverhalten der Verbrennung verbessert wurde. Der Abfall des Luftüberschusses nach dem Auffüllen sowie der starke Anstieg desselben gegen Schluss der Verbrennung (wie es in Figur 6.1 gezeigt wurde) wurden kompensiert. Damit verbunden ist eine beträchtliche Reduktion der mittleren Kohlenmonoxidemissionen.

Beim ungeregelten Versuchsabschnitt von 500 Minuten Dauer aus Figur 6.1 betragen die normierten CO-Emissionen im Mittel  $1168\text{ mg/m}^3$ . *Dieser Wert ist auf die im Versuchsabschnitt aussergewöhnlich gute Lufteinstellung zurückzuführen und sehr schlecht reproduzierbar.* Es ist nicht möglich, einen konkreten Wert für die Emissionen im ungeregelten Fall anzugeben, weil die Emissionen beliebig durch die Einstellung der Luftzufuhr beeinflusst werden können.

Bei dem im Kapitel 5 ausführlich beschriebenen Versuch betragen die CO-Emissionen während eines ebenfalls 500 Minuten dauernden ausgewählten Intervalls bloss noch  $931\text{ mg/m}^3$ . *Ein derartiges Ergebnis ist hingegen jederzeit reproduzierbar.* Ebenfalls sind die Auswirkungen der Brückenbildung reduziert; die Primärlüfterhöhung erweist sich in diesen Situationen als wirkungsvoll. Trotzdem sind die Schwankungen der Flammentemperatur noch relativ gross.

In einem weiteren Schritt wurde die Abtastzeit auf fünf Sekunden reduziert. Weil die Datenaquisition keine nennenswerte Verkürzung der Abtastzeit zulässt, schlossen wir einen zusätzlichen Einplatinen-Mikrocomputer für die Flammentemperaturregelung an die Feuerung an. Das dafür geschriebene Regelprogramm passt den Flammentemperatursollwert nach Formel 7.1 kontinuierlich an die Sekundärluftmenge an. Zum Testen der Sollwertanpassung haben wir die Sekundärluftvorwahl

rampenartig zwischen 10 und 20 m<sup>3</sup>/h verstellt. Die Verringerung der Abtastzeit erlaubte problemlos eine Verdoppelung der Proportionalkonstante auf 0.1; die Integrationszeitkonstante wurde vorerst nicht verändert.

Die Resultate mit Buchenholz sind in Figur 7.18 zu sehen. Figur 7.19 zeigt einen gleich geregelten Versuch mit Tannenholz. Diese Versuche zeigen vor allem, dass die leistungsabhängige Anpassung des Flammentemperatursollwertes korrekt gewählt ist. Trotz variabler Leistung und verschiedener Holzart bleibt die Verbrennungsqualität konstant. Gegenüber der Abtastzeit von 60 s sind die Schwankungen der Flammentemperatur nochmals reduziert. Bei variabler Sekundärluft betragen die Emissionen in den dargestellten Versuchsabschnitten nur noch 471 mg/m<sup>3</sup> für Buchen- und 211 mg/m<sup>3</sup> für Tannenholz. Überraschenderweise verläuft die geregelte Verbrennung von Tannenholz besser als die von Buchenholz; bei der ungeregelten Verbrennung war eher das Gegenteil der Fall. Wahrscheinlich ist die stärkere Reaktion des Tannenholzes auf die Primärluft dafür verantwortlich.

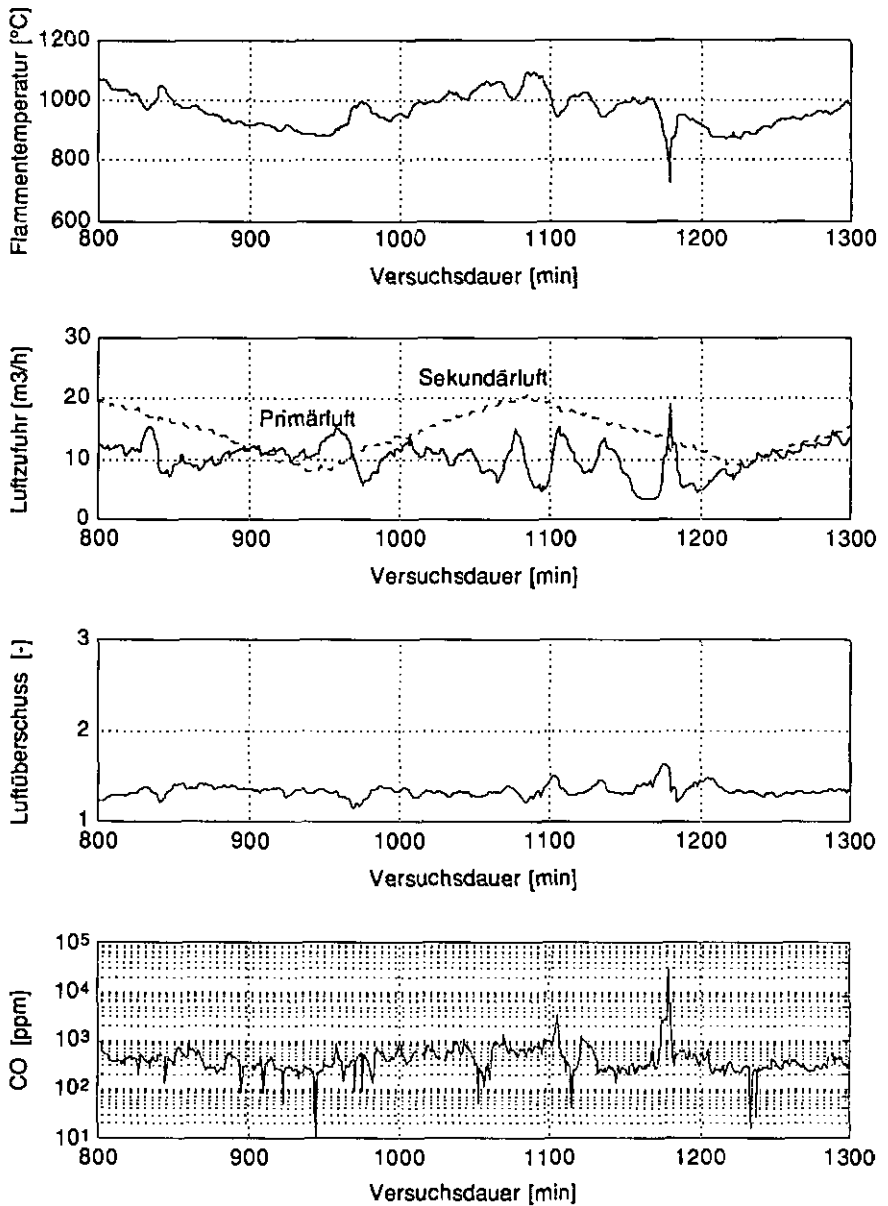
Resultate mit der in diesem Kapitel entworfenen Regelung sind in den Figuren 7.20 bis 7.22 abgebildet. Figur 7.20 zeigt einen Versuchsabschnitt mit Buchenholz, Figur 7.21 einen mit Tannenholz und Figur 7.22 die Resultate mit Tannenholz bei variabler Leistung. Die Flammentemperatur wird hier sehr eng geregelt, ausser wenn die Stellgrösse beschränkt wird. Trotzdem sind die Emissionen nicht mehr reduziert gegenüber den vorigen Versuchen. Wie aus den CO( $\lambda$ )-Charakteristiken hervorgeht, besteht eine gewisse Toleranz der Verbrennung gegenüber Änderungen der Flammentemperatur, ohne dass die Verbrennung schlechter wird. Wir können daraus auch schliessen, dass einen eventuell mögliche weitere Verbesserung der Regelung die Emissionen nicht mehr verringern könnte.

In Tabelle 7.1 sind noch einmal alle hier erwähnten Messresultate zusammengefasst.

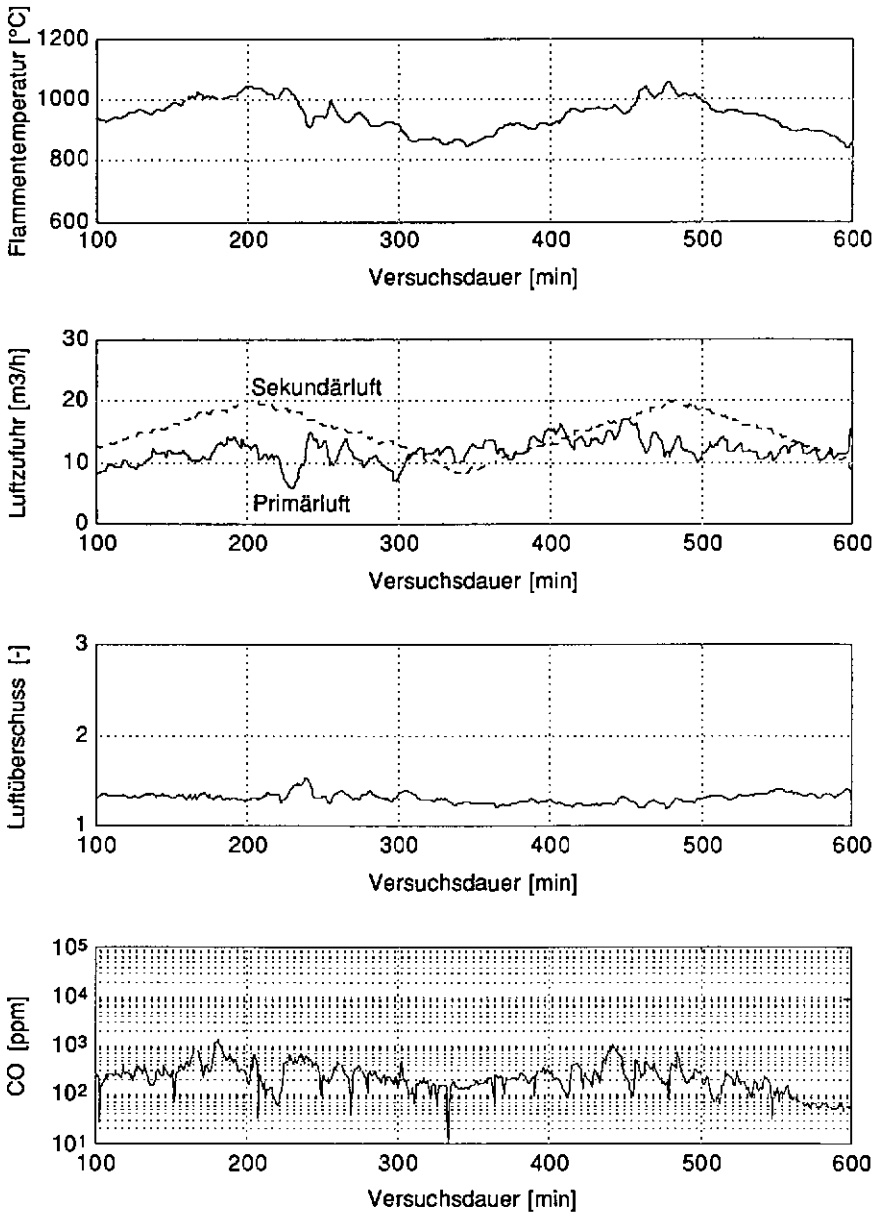
CO-Emissionen [mg/m <sup>3</sup> ]	Buche	Tanne
ohne Regelung, <i>aussergewöhnlich gute Lufteinstellung</i>	1168	
Abtastzeit 60s; Prop. konstante 0.05; Integrationszeit 600s	931	
Abtastzeit 5s; Prop. konstante 0.1; Integrationszeit 600s	471	211
Abtastzeit 1s; Prop. konstante 0.5; Integrationszeit 300s	593	34-299

Tabelle 7.1 Vergleich der CO-Emissionen mit verschiedenen Regelungen [mg/m<sup>3</sup>]. Es wurden jeweils Versuchsabschnitte von 500 Minuten Dauer betrachtet.

## 7 Verbrennungsregelung

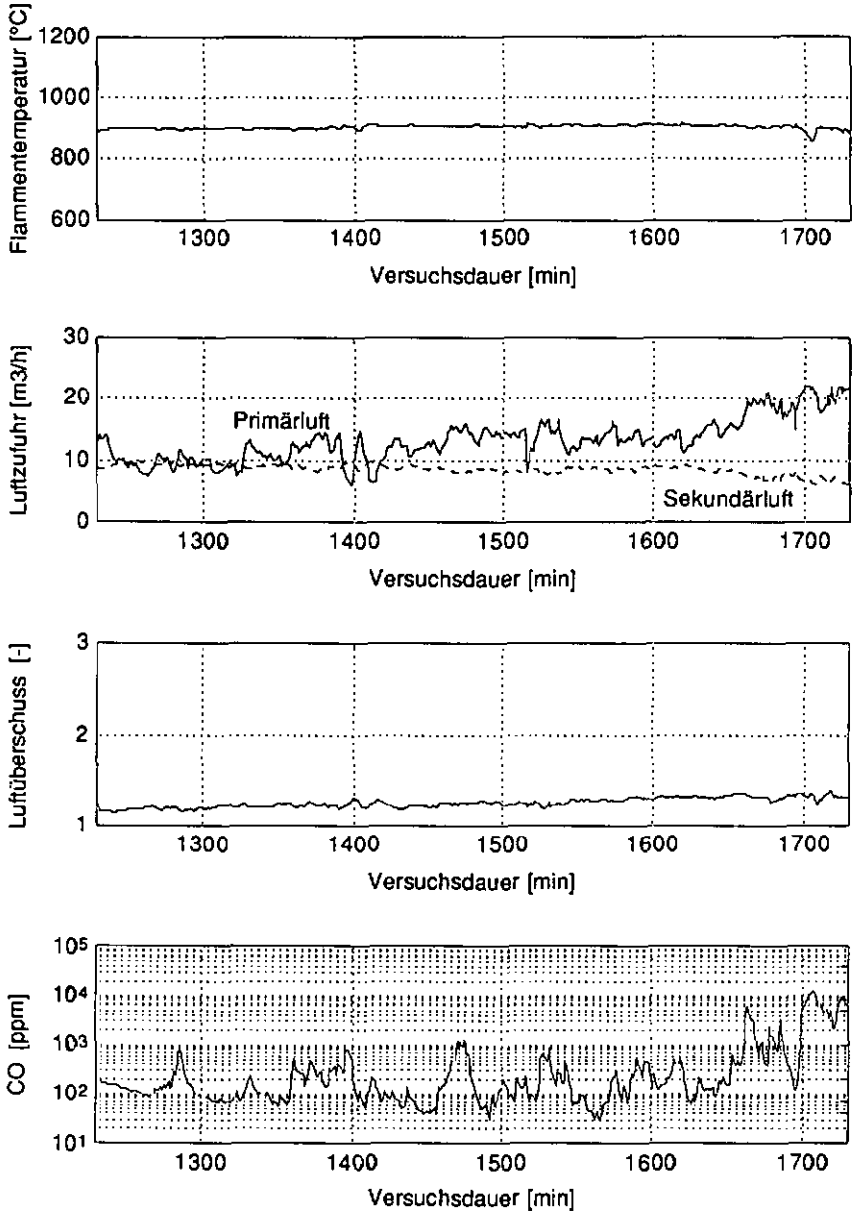


Figur 7.18 Ausschnitt aus einem geregelten Versuch mit Buchenholz der Feuchtigkeit 16.4 %. Mittelwert der CO-Emission:  $471 \text{ mg/m}^3$ . ( $T_A=5\text{s}$ ;  $T_I=600\text{s}$ ;  $k_P=0.1$ )

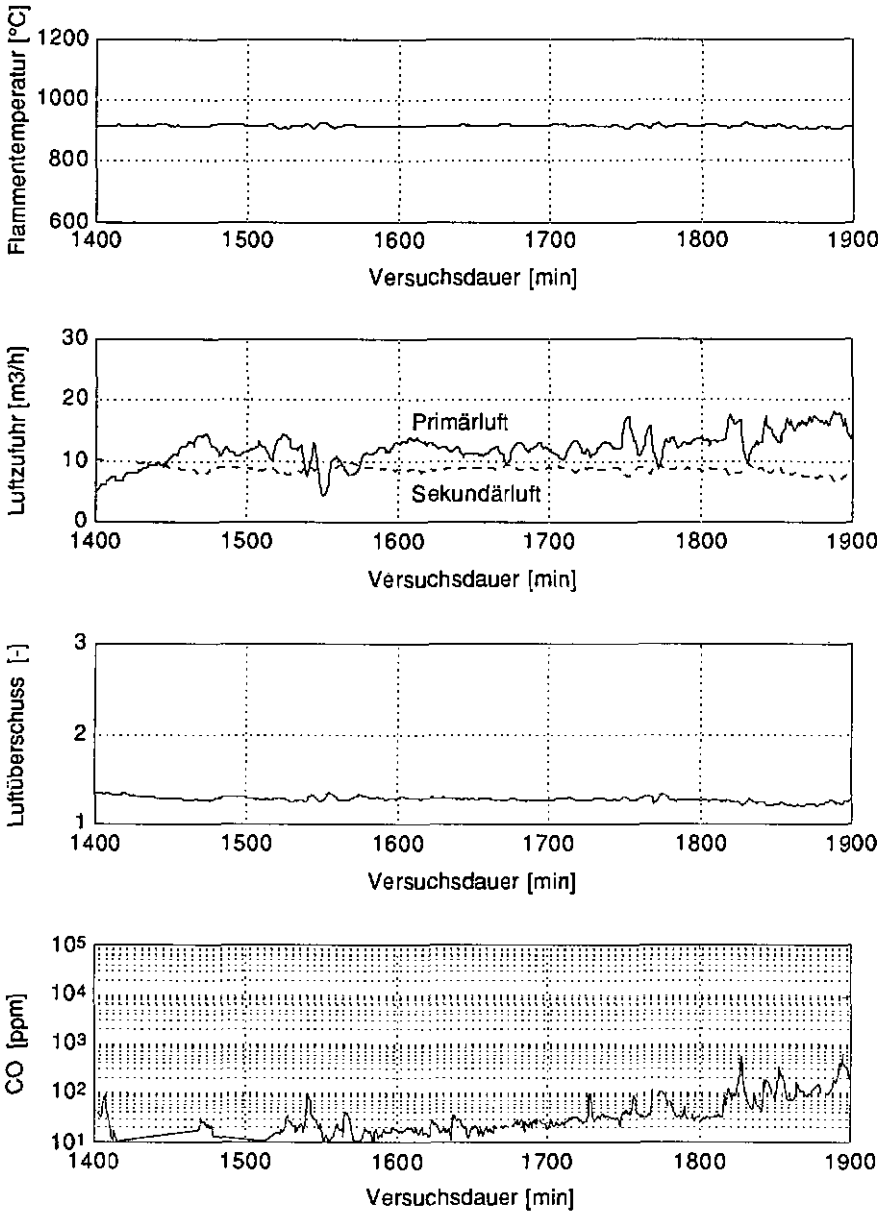


Figur 7.19 Ausschnitt aus einem geregelten Versuch mit Tannenholz der Feuchtigkeit 14.4 %. Mittelwert der CO-Emission: 211 mg/m<sup>3</sup>. ( $T_A=5s$ ;  $T_I=600s$ ;  $k_p=0.1$ )

## 7 Verbrennungsregelung

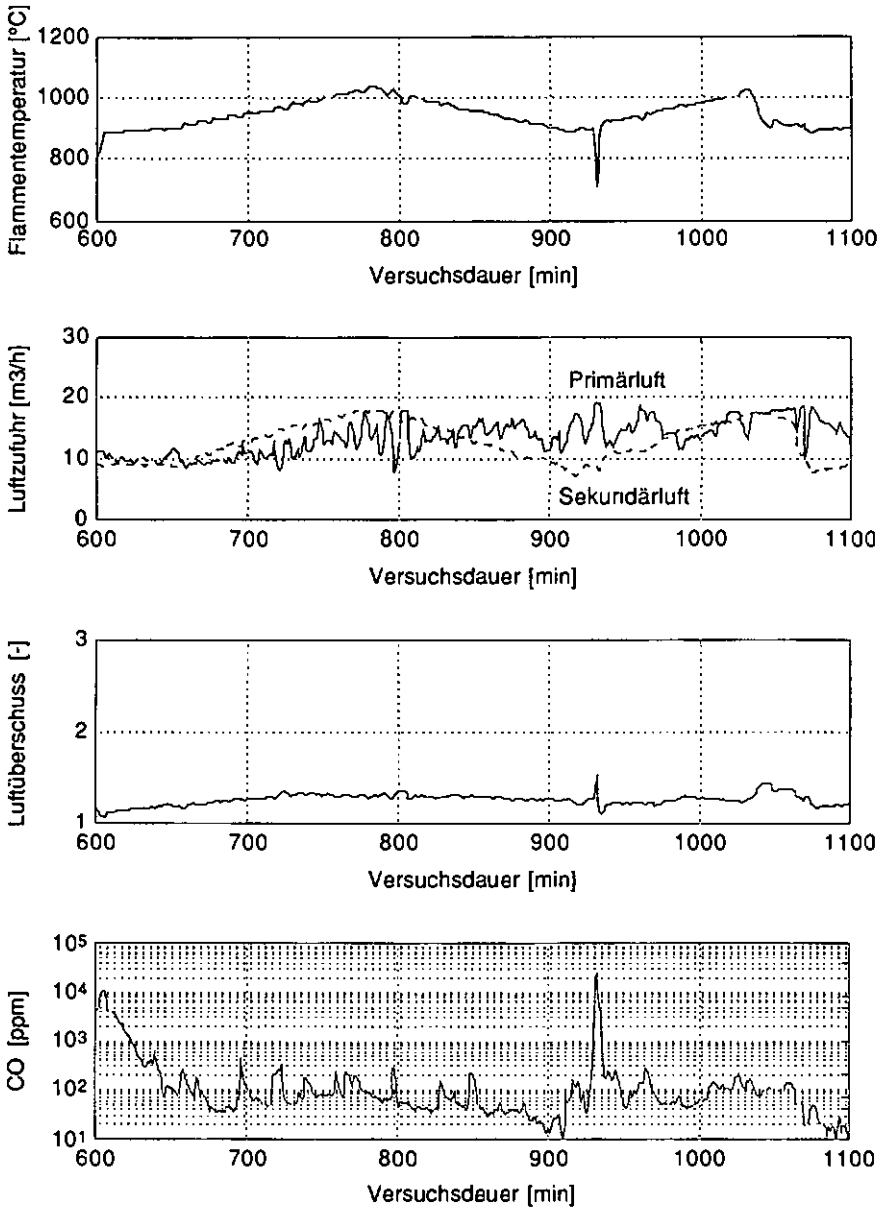


Figur 7.20 Ausschnitt aus einem geregelten Versuch mit Buchenholz der Feuchtigkeit 14.8 %. Mittelwert der CO-Emission: 593 mg/m<sup>3</sup>. ( $T_A=1s$ ;  $T_I=300s$ ;  $k_p=0.5$ )



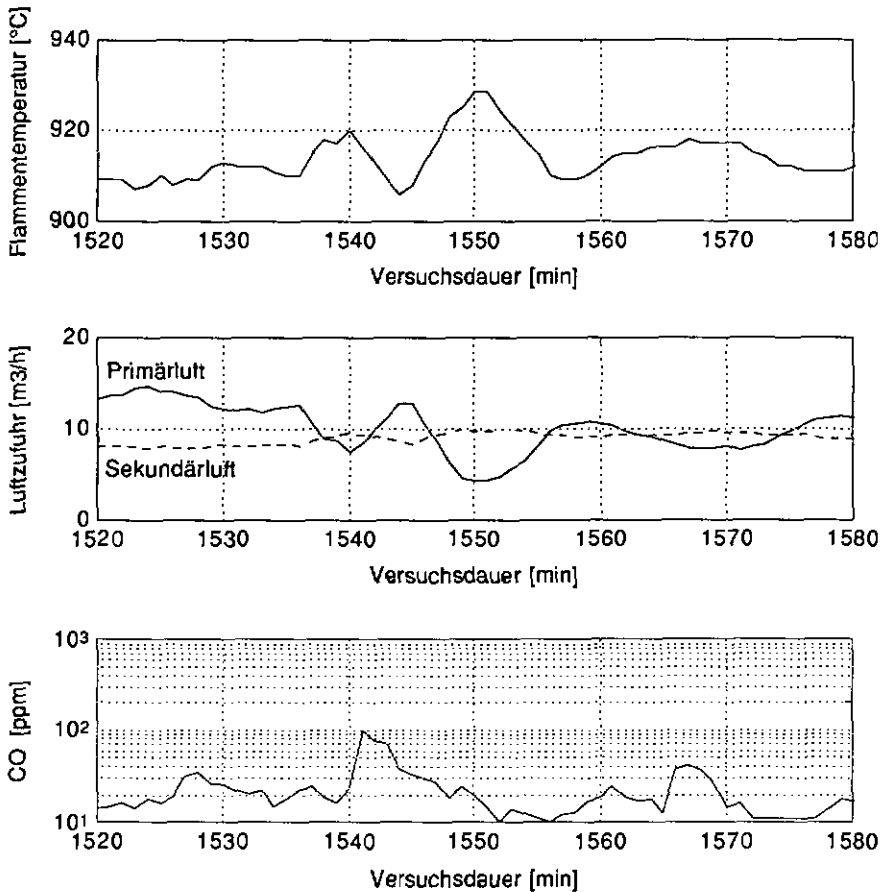
Figur 7.21 Ausschnitt aus einem geregelten Versuch mit Tannenholz der Feuchtigkeit 15.8 %. Mittelwert der CO-Emission: 34 mg/m<sup>3</sup>. ( $T_A=1s$ ;  $T_I=300s$ ;  $k_P=0.5$ )

## 7 Verbrennungsregelung



Figur 7.22 Ausschnitt aus einem geregelten Versuch mit Tannenholz der Feuchtigkeit 15.8 %. Mittelwert der CO-Emission: 299 mg/m<sup>3</sup>. ( $T_A=1s$ ;  $T_I=300s$ ;  $k_p=0.5$ )

Anhand Figur 7.23 können wir das Verhalten unserer Regelung beim Auftreten von Störungen im Detail betrachten: Abweichungen der Flammentemperatur vom Sollwert  $910\text{ }^{\circ}\text{C}$  führen zu fast proportionalen Korrekturen der Primärluft; der integrale Anteil der Regelung wirkt langsam. Anwachsende Schwingungen treten offensichtlich nicht auf. Bei Minute 1550 ist die untere Grenze der Primärluft erreicht, deshalb steigt die Flammentemperatur noch weiter an. Die Störungen verlaufen nicht ganz symmetrisch, ein Anstieg der Flammentemperatur verläuft geringfügig steiler als ein Absinken. Bei kleinen Störungen ist noch keine Korrelation zwischen den Kohlenmonoxidemissionen und der Flammentemperatur erkennbar.



Figur 7.23 Ausschnitt aus Figur 7.21

## 7 Verbrennungsregelung

In gewissen Versuchsabschnitten wirkt sich bei der Regelung die Stellgrößenbeschränkung der Primärluft negativ auf die Regelabweichungen aus. Die minimale Primärluftmenge wurde auf etwa  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  limitiert, damit der Sekundärluftventilator in keinem Betriebszustand Luft rückwärts durch die Primärluftzufuhr herausdrücken kann. Diese Sicherheitsmarge ist notwendig, weil die Luftmengen im Betrieb nicht gemessen werden. Die Beschränkung nach oben wird durch die Ventilatorleistung gegeben.

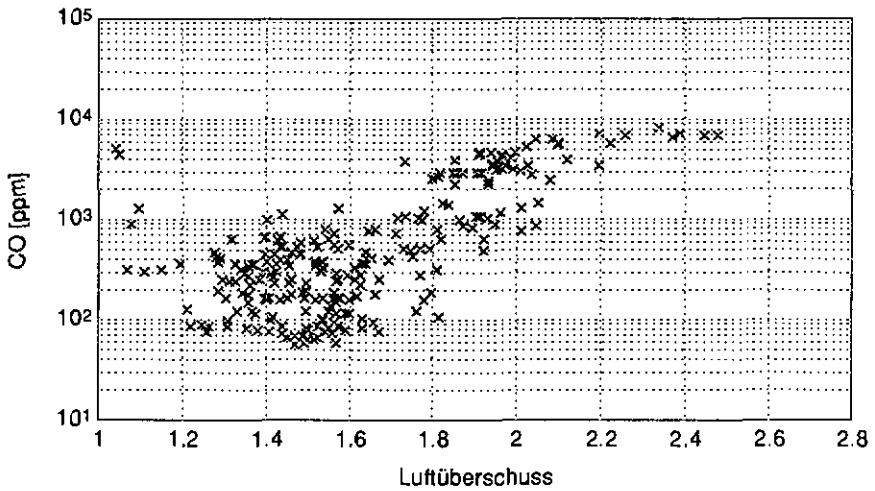
***Für den praktischen Betrieb wäre es wünschenswert, die Primärluft von etwa 4 bis  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  verstellen zu können.***

Die Gegenüberstellung der  $\text{CO}(\lambda)$ -Charakteristiken der ungeregelten (Figur 7.23) und der geregelten (Figur 7.24) Feuerung zeigen eindrücklich die Qualität der Verbrennungsregelung auf. Der Bereich des erreichten Luftüberschusses ist im geregelten Fall sehr eng, die  $\text{CO}$ -Emissionen sind gering.

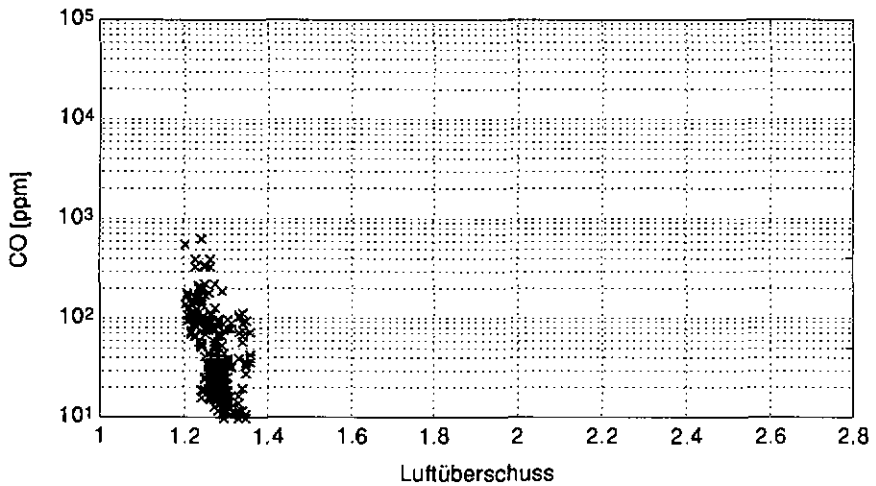
**Bemerkung zu allen Messungen:** Um die Regelung nicht komplizierter zu machen, als sie zukünftig in der Praxis realisiert werden kann, wird die Luftzufuhr nur für die Auswertung der Resultate gemessen. Die Luftzufuhr wird also nach einer einmaligen Eichung nur gesteuert; ebenso wie der Flammentemperatursollwert nur aufgrund des Steuerausgangs für die Sekundärluft berechnet wird. Bei der genannten Eichung wurde der Zusammenhang zwischen der gemessenen Zufuhr der Primär- und Sekundärluft und dem Analogeingang der Frequenzwandler eingestellt.

Der Regelung standen also in allen dokumentierten Fällen keine Messdaten der Luftzufuhr zur Verfügung. Dies ist der Grund, warum der Flammentemperatursollwert manchmal von den aus den Messungen berechenbaren Werten abweicht. Aufgrund eines sich während des Betriebs ändernden Druckabfalls in der Luftzufuhr kann nämlich die vorgegebene Luftmenge von der effektiven abweichen. Im Falle der Primärluft ist dies völlig problemlos, da diese ja nach der Flammentemperatur geregelt wird. Bei einer falschen Sekundärluftmenge erreicht die Feuerung allenfalls nicht die gewünschte Leistung; diese kann jedoch auch über ein externes Heizungsregelsystem korrigiert werden.

Einzig eine falsche Annahme für die Sekundärluftmenge bei der Berechnung der Solltemperatur mindert die Regelgenauigkeit. Ein Fehler der Sekundärluftmenge von  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  ergibt nach Formel 7.1 einen um  $10^\circ\text{C}$  falschen Sollwert der Flammentemperatur. Die erreichte Genauigkeit der Lufteinstellung ist jedoch offensichtlich für die Regelung ausreichend.



Figur 7.23  $\text{CO}(\lambda)$ -Charakteristik der unregelmäßigen Feuerung. Alle Daten des Versuchs aus Figur 6.1 sind gezeigt.



Figur 7.24  $\text{CO}(\lambda)$ -Charakteristik der geregelten Feuerung. Alle Daten des Versuchs aus Figur 7.21 sind gezeigt.

## 8 Steuerung des Betriebsablaufs

---

### 8.1 Vollständiger Abbrandzyklus

Die im Kapitel 7 beschriebene Flammentemperaturregelung wurde ausschliesslich für die Bedingungen während der normalen Betriebsphase entworfen. Ein ganzer Abbrandzyklus zwischen zwei mal Holznachfüllen umfasst jedoch die folgenden drei Phasen:

- Die **Startphase** folgt auf das Nachfüllen von Holz. Sie ist gekennzeichnet durch ein schlecht oder gar nicht ausgebildetes Glutbett und eine ungenügende Verbrennungstemperatur, aber einen genügenden Holzvorrat. Für diese Phase muss ein spezieller Steueralgorithmus entworfen werden. Das Ziel der Startprozedur ist, so schnell wie möglich eine vollständige Verbrennung zu erreichen.
- In der normalen **Verbrennungsphase** ist das Glutbett gut ausgebildet und es liegt noch genügend Holz im Füllschacht. Die Flammentemperatur wird wie in Kapitel 7 beschrieben geregelt. Über die Sekundärluftvorwahl kann die Feuerungsleistung in gewissen Grenzen eingestellt werden.
- Wenn der Holzvorrat aufgebraucht ist, beginnt die **Gluterhaltungsphase**. Wie in Figur 6.6 gezeigt wurde, verändert sich die Flammentemperaturreaktion im Ausbrand gegenüber der normalen Verbrennung. Dies sollte durch eine übergeordnete Kontrollschleife detektiert werden, um ein schlechtes Funktionieren der Flammentemperaturregelung zu verhindern. Bei Feststofffeuerungen wird in der Ausbrandphase der restliche Brennstoff nur noch äusserst unvollständig verbrannt. Deshalb ist es zur Reduktion der gesamten Schadstoffemissionen am sinnvollsten, die Luftzufuhr in dieser Phase ganz zu schliessen. Ausserdem wird die nächste Startphase bedeutend kürzer, wenn noch glühende Holzkohle vorhanden ist.

Wir entwerfen in diesem Kapitel Steueralgorithmen, welche zusammen die Verbrennung im gesamten Betriebsablauf führen. Jeder Algorithmus der oben beschriebenen Phasen soll selbst erkennen, wenn seine Zeit abgelaufen ist, und dann das Kommando an die nächste Phase übergeben. Im folgenden Kapitel sind diese drei Phasen im Detail beschrieben.

## 8 Steuerung des Betriebsablaufs

### 8.1.1 Startphase

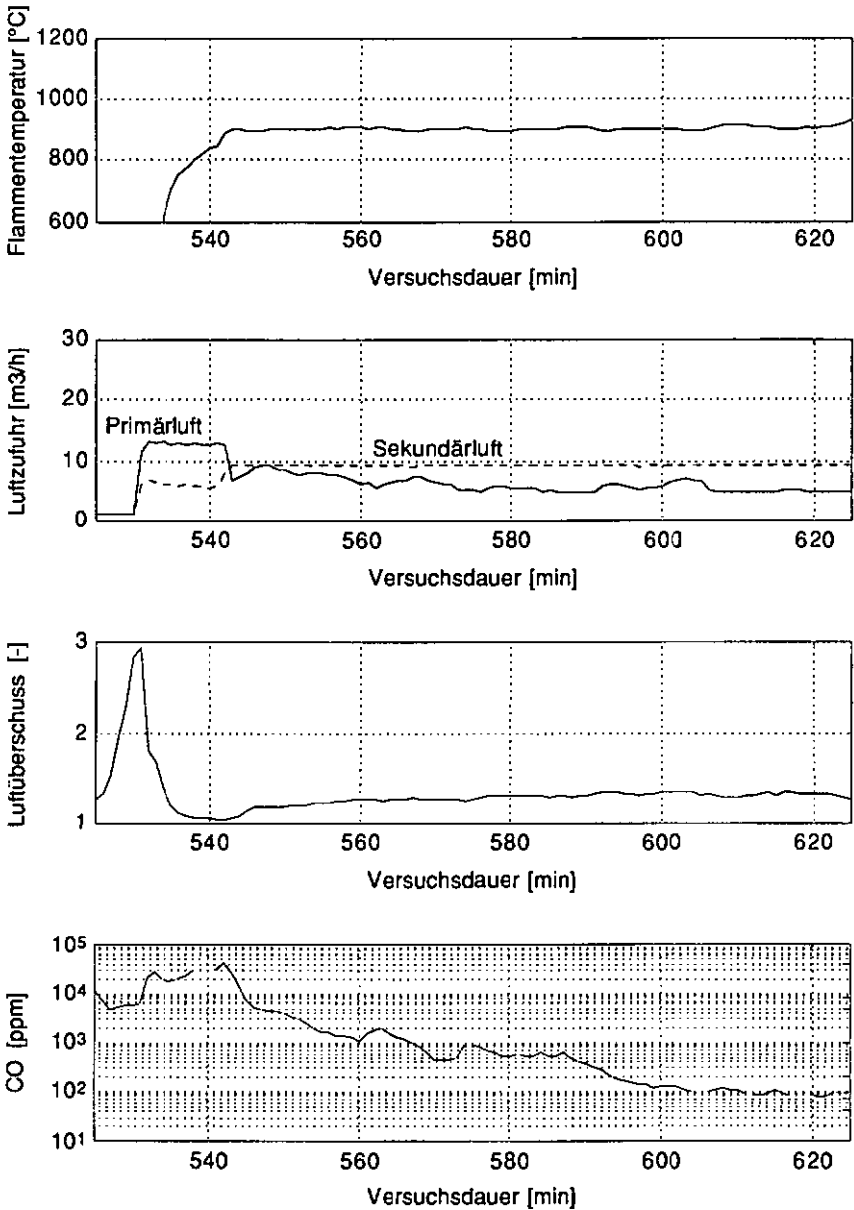
Das Ziel dieser Phase ist, möglichst schnell eine vollständige Verbrennung zu erreichen. Diese charakterisieren wir wie im Kapitel 7 durch die Flammentemperatur. Zu Beginn der Startphase ist die Verbrennung jedoch noch unvollständig. Deshalb kann weder die Verbrennungsrechnung aus Kapitel 3 noch der modellierte Zusammenhang zwischen der Primärluftzufuhr und der Flammentemperatur aus Kapitel 6 angewandt werden.

***Weil in der Startphase fest nichts über die Verbrennung bekannt ist, verzichten wir auf eine rückgekoppelte Regelung.***

In der Startphase ist das Glutbett zu klein, es werden zu wenig brennbare Gase erzeugt. Deshalb ist der Luftüberschuss viel zu gross und die Flammentemperatur zu niedrig. Mit viel Primärluft und wenig Sekundärluft fachen wir die Verbrennung an. Bei unseren Versuchen hat sich eine Einstellung mit etwa 15 m<sup>3</sup>/h Primärluft und 7 m<sup>3</sup>/h Sekundärluft bewährt. Wenn die Glut wächst, entstehen mehr brennbare Gase. Solange noch keine genügende Temperatur erreicht wird, verbrennen diese Gase trotz Luftüberschuss nur unvollständig. Es erfolgt erst dann eine schlagartige Zündung, wenn die Holzgas – Sekundärluftmischung eine gewisse Konzentration an brennbaren Gasen (CO, H<sub>2</sub>, Kohlenwasserstoffe) erreicht. Der resultierende steile Anstieg der Flammentemperatur ist leicht zu detektieren. Beim Erreichen des Sollwertes der Flammentemperatur wird die PI-Regelung gestartet. Diese reduziert nun wenn nötig die Primärluftmenge, um einen Luftmangelzustand zu vermeiden.

Unser Startalgorithmus sieht also folgendermassen aus:

1. Nach dem Auffüllen wird die Steuerung gestartet. Diese stellt die Primärluftzufuhr auf 15 m<sup>3</sup>/h und die Sekundärluft auf 7 m<sup>3</sup>/h ein.
2. Wenn die Flammentemperatur 850 °C erreicht, wird die Sekundärluft auf 10 m<sup>3</sup>/h erhöht. Dies ist die minimale Luftmenge für einen stabilen und sicheren Betrieb.
3. Beim Erreichen von 900 °C Flammentemperatur wird die Primärluftregelung gestartet und die Startphase beendet.



Figur 8.1 Startphase nach dem Auffüllen. Nach Minute 543 setzt die PI-Regelung automatisch ein.

## 8 Steuerung des Betriebsablaufs

Figur 8.1 zeigt den Verlauf einiger wichtiger Messgrößen während einer derart gestarteten Verbrennung. Die Dauer der eigentlichen Startphase hängt sehr stark vom noch vorhandenen Glutbett ab. Ebenso spielt die Stückgröße des aufgelegten Holzes eine wichtige Rolle. Nach einem erfolgreichen Start dauert es fast eine Stunde, bis die Verbrennung wirklich stabil verläuft und die Kohlenmonoxidemissionen ihr Minimum erreichen. Diese Zeit ist durch die Feuerungskonstruktion gegeben und in Relation zur gesamten Abbrandzeit von mehr als 15 Stunden zu sehen.

Möglicherweise könnte die Startphase verbessert werden, indem die Primärluft langsam von vielleicht  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  an geöffnet würde. Die Anstiegsgeschwindigkeit könnte dabei von der vorausgehenden Stillstandszeit abhängig gewählt werden. Damit könnten wir vermeiden, dass der Luftüberschuss vor allem am Anfang allzu hoch wird. Ausserdem könnte die Sekundärluft von einer minimalen Einstellung aus periodisch weit erhöht werden, um die Zündung der produzierten Schwelgase zu provozieren. Hierzu müssten jedoch noch systematische Versuche durchgeführt werden.

### 8.1.2 Normale Verbrennungsphase

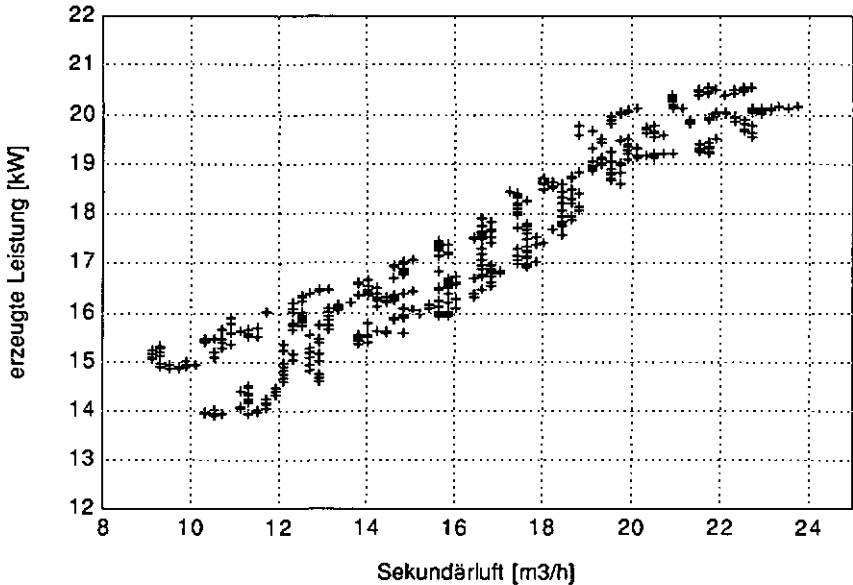
Während dieser Phase laufen die folgenden Prozesse Parallel ab:

- Die im Kapitel 7 beschriebene Flammentemperaturregelung korrigiert ständig die Primärluft.
- Laufend wird überwacht, ob die Bedingungen für ein korrektes Funktionieren der Flammentemperaturregelung noch erfüllt sind.
- Ein Heizungsregler teilt in dieser Phase der Verbrennungsregelung den Wärmebedarf mit, welcher über ein Vorfilter in eine äquivalente Sekundärluftstellgröße umgewandelt wird. (Leistungsregelung)

Das Vorfilter für die Sekundärluftstellgröße verhindert zu schnelle Änderungen des Sekundärluftstellsignals, welche die Regelgüte beeinträchtigen könnten (siehe Figur 7.7).

Figur 8.2 zeigt die gemessene Abhängigkeit der im Füllschacht und Wärmetauscher erzeugten Leistung von der Sekundärluftmenge während einer normalen Betriebsphase. Abhängig vom Holzvorrat kann die erzeugte Leistung um einige kW schwanken; der Heizungsregler kann jedoch wenn nötig in einer langsamen Regelschleife die Feuerungsleistung nachstellen. Falls der Wärmebedarf die minimal produzierte Wärmeleistung unterschreitet, kann notfalls künstlich auf die Ausbrandphase umgeschaltet werden. Dann muss bei erneutem Wärmebedarf wieder ein Start eingeleitet werden. Das Abstellen der Feuerung aus der

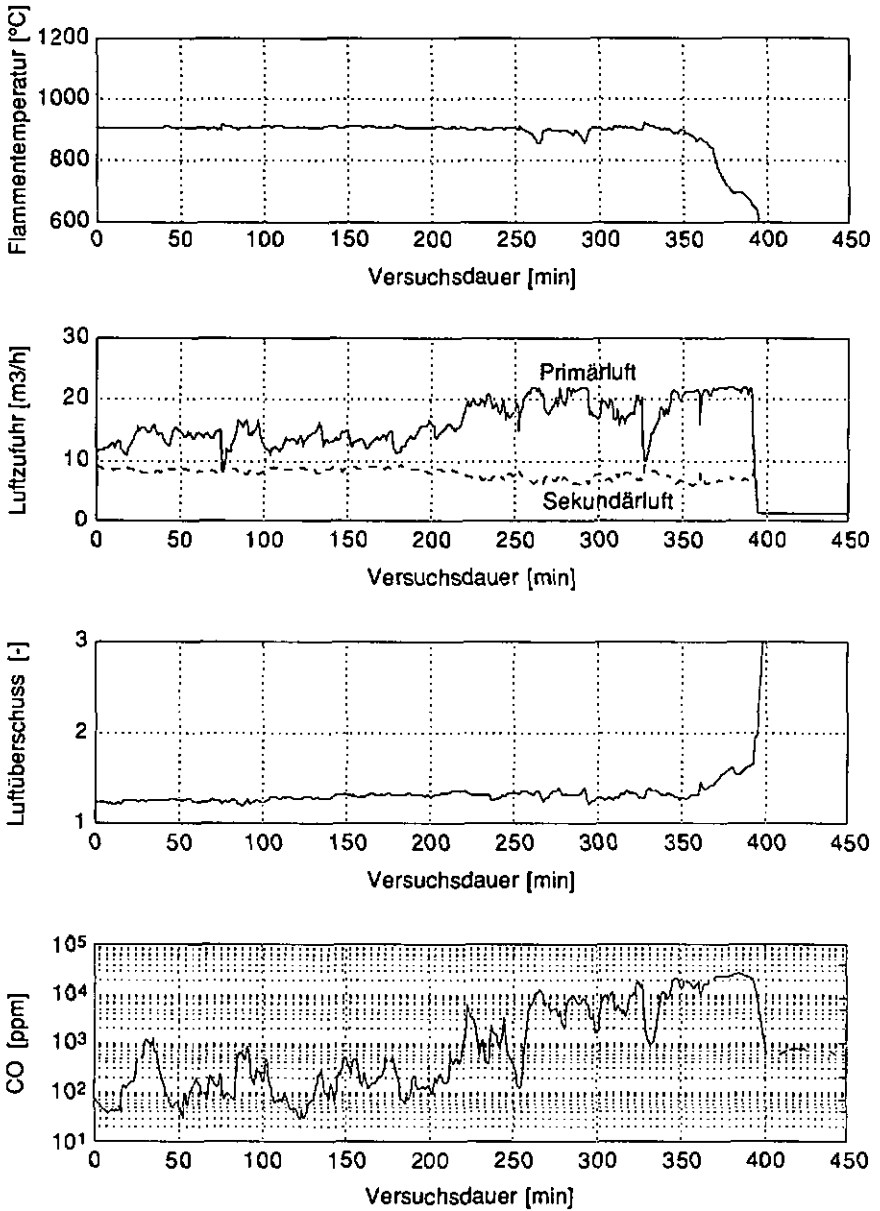
Betriebsphase wird jedoch mit erhöhten Emissionen erkauft, weil das gesamte, heisse Glutbett weiterschwelt. Besser ist es in diesen Fall, einen genügend grossen Zwischenspeicher anzuschliessen, welcher die überschüssige Wärme aufnehmen kann.



Figur 8.2 Gemessener Zusammenhang zwischen der Sekundärluftzufuhr und der wasserseitig erzeugten nutzbaren Leistung. Während der dargestellten Versuchsphase wurde die Sekundärluft mehrmals im Bereich zwischen 10 und 22 m<sup>3</sup>/h rampenartig geöffnet und wieder geschlossen.

Während dem normalen Betrieb muss laufend überwacht werden, ob die Voraussetzungen für die Modellierung noch erfüllt sind. Das heisst unter anderem, ob noch genügend Holz auf der Glut liegt. Figur 8.3 zeigt das Verhalten der Regelung bei fast leerer Feuerung. Die Primärluft wird voll geöffnet, und trotzdem wird die Flammentemperatur nicht mehr erreicht. Beobachtungen haben ergeben, dass immer vor dem vollständigen Ausbrand die Primärluftzufuhr langsam aufgeregelt wird, weil die Dichte des Glutbettes abnimmt. Deshalb stellen wir die Feuerung ab, wenn die Flammentemperatur während 30 aufeinanderfolgenden Minuten den Flammentempersollwert nicht mehr erreicht.

## 8 Steuerung des Betriebsablaufs



Figur 8.3 Dieser Ausschnitt eines Abbrandes zeigt einen typischen Übergang in die Ausbrandphase.

Grundsätzlich ist es möglich, dass die Regelung bei einem extremen Nachrutschen von Holz nach einer Brückenbildung in einen Luftmangelzustand gerät. Dieses Problem ist beim Versuchsbetrieb aufgetreten, als die Sekundärluftzufuhr zu stark mit der Primärluft gekoppelt war. Die Regelung hatte beim Erhöhen der Primärluftzufuhr bis zu deren Maximum auch den Innendruck in der Feuerung erhöht und dadurch die Sekundärluft praktisch auf Null reduziert. Beim darauf folgenden brüskem Nachrutschen von Holz gerät die Verbrennung direkt in einen extremen Luftmangel. Weil dabei die Flammentemperatur ständig unter dem Sollwert blieb, reagierte die Regelung falsch. Sie liess die Primärluftzufuhr voll geöffnet und reduzierte damit die Flammentemperatur weiter, weil sich durch das Anfachen des nachgerutschten Holzes der Luftmangel weiter erhöhte.

Nach einer stärkeren Entkoppelung der Sekundär- von der Primärluftzufuhr trat dieses Problem nicht mehr auf. Sicherheitsshalber wurde der im folgenden beschriebene Abstellalgorithmus durch eine Kontrolle dieser Zustände ergänzt.

Der Abstellalgorithmus sieht folgendermassen aus:

1. Bei jedem Abtastzyklus wird ein Zähler erhöht, wenn die Primärluftzufuhr den maximalen oberen Grenzwert erreicht. Der Zähler wird auf Null gesetzt, wenn der Grenzwert wieder unterschritten wird.
2. Wenn der Zähler während zehn Minuten nicht zurückgesetzt wurde, also den Stand von 600 erreicht, wird die Primärluftzufuhr auf den Wert der Sekundärluftzufuhr gestellt. Dann wird der Zähler zurückgesetzt. Im Falle eines Luftmangelzustandes wird jetzt wegen dem grösseren Luftüberschuss die Flammentemperatur steil ansteigen. Der Regler reagiert darauf wieder korrekt mit einer Primärluftreduktion. Bei zu hohem Luftüberschuss geschieht dabei nichts.
3. Wenn der Zähler drei mal zehn Minuten gezählt hat, ohne den Flammentempersollwert je wieder zu erreichen, ist die Feuerung leer oder das Holz völlig blockiert. Darauf wird die Luftzufuhr ganz abgestellt, die Regelung gestoppt und dem Betreiber angezeigt, dass Holz nachgefüllt werden muss.

Die Zeit bis zum definitiven Abstellen beträgt hier 30 Minuten. Diese Wartezeit ist notwendig, um ein zu frühes Abstellen bei einer Brückenbildung zu verhindern. Bei einer besseren Gestaltung des Füllschachtes, welche das Holznachrutschen erleichterte, könnte diese Zeit jedoch sicherlich reduziert werden.

## 8 Steuerung des Betriebsablaufs

Wegen der stark limitierten Primärluftzufuhr wäre es sinnvoll, beim Auftreten einer Sättigung dieser Luftzufuhr zusätzlich die Sekundärluft langsam bis auf  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  zu reduzieren. Dadurch würde der Regelbereich der Primärluft im Verhältnis zur Sekundärluft vergrössert. Diese Massnahme könnte den Luftüberschuss verringern und damit den Eintritt in die Ausbrandphase verzögern.

### 8.1.3 Gluterhaltungsphase

In der Gluterhaltungsphase wird die Luftzufuhr mit Ventilen in der Primär- und Sekundärluftzufuhr dicht geschlossen. Dadurch bleibt die Glut während etwa fünf Stunden erhalten, so dass die Feuerung nach dem Auffüllen nicht wieder angezündet werden muss. Manuell oder durch einen Türkontaktschalter wird der Steuerung mitgeteilt, wann die Feuerung gefüllt wird. Darauf wird auf den Startalgorithmus umgeschaltet.

Leider können wir nichts über die Emissionen während der Gluterhaltungsphase aussagen, denn dazu müssten wir den extrem geringen Rauchgasvolumenstrom in dieser Phase messen. Wir schätzen jedoch, dass die emittierte Kohlenmonoxidmenge wegen der geringen Rauchgasmenge klein bleibt. Weil die verbleibende Holzkohle in dieser Phase kaum noch flüchtige Stoffe enthält, sind die Kohlenwasserstoffemissionen sicher sehr klein. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass beim Verbrennen der restlichen Holzkohle in der Ausbrandphase eine beträchtliche Menge Kohlenmonoxid entsteht, wie die Messungen in Figur 8.3 zeigen.

Die Betriebsweise, bei der auf ein noch aktives Glutbett aufgefüllt wird, weist entscheidende Vorteile auf: Das tägliche Nachfüllen beschränkt sich auf das Auflegen von grossen Holzscheiten. Der Betreiber braucht also selten kleingehacktes Holz zum Wiederaufladen. Dies reduziert den täglichen Bedienungsaufwand beträchtlich. Ausserdem werden die Start- und die Ausbrandphase, welche bei konventionellen Stückholzfeuerungen immer mit grossen Emissionen verbunden sind, stark verkürzt.

## 9 Schlussfolgerungen und Ausblick

---

### 9.1 Schlussfolgerungen

#### 9.1.1 Leistungsmodulation bei Stückholzfeuerungen mit unterem Abbrand

Bei einer geeigneten Feuerungskonstruktion kann die Abbrandgeschwindigkeit durch eine Drosselung der Primärluftzufuhr verringert werden, ohne dass die Verbrennungsqualität abnimmt. Dabei wird bei der Feuerung eine Trennung der Luftzufuhr in Primär- und Sekundärluft vorausgesetzt. Ebenso muss konstruktiv gewährleistet sein, dass *alle* Verbrennungsgase mit der richtigen Menge Sekundärluft gemischt einen isolierten Ausbrandkanal durchströmen.

Die minimale Leistung bei noch guter Verbrennung ist aus den folgenden Gründen beschränkt:

- Wenn die Oberfläche der Glut den Füllschachtquerschnitt nicht mehr ganz ausfüllt, kann das Holz nicht mehr regelmässig Nachrutschen.
- Die Durchmischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft verschlechtert sich, wenn die Gasströme kleiner werden.
- Die im Verhältnis zur freigesetzten Leistung grösser werdenden Verluste können die Verbrennungstemperatur zu stark reduzieren.

Weil die Glut nur langsam wächst bzw. schrumpft, kann die Leistung auch nur langsam verändert werden.

Eine Leistungsmodulation ist also auch bei Stückholzfeuerungen möglich. Die längere Abbrandzeit bei geringer Leistung erhöht die Autonomie der Feuerung und ermöglicht die Verwendung kleinerer Wärmespeicher.

Allgemeine Bemerkung: Eine Vorwärmung der Luftzufuhr ist, im Gegensatz zu vielen Hinweisen in der Literatur, nicht notwendig. Wenn die Luftvorwärmung wie bei der von uns verwendeten Feuerung dem Glutbett die Wärme entzieht, resultiert daraus sowieso keine höhere Flammentemperatur. Soll aus bestimmten Gründen eine sehr hohe Flammentemperatur erzielt werden, muss die Energie zur Luftvorwärmung den *ausgebrannten* Gasen entzogen werden.

## 9 Schlussfolgerungen

### 9.1.2 Verhalten einer Stückholzfeuerung mit unterem Abbrand bei konstanter Luftzufuhr

Während dem Abbrand einer Charge Holz können wir eine zeitliche Folge von Prozessen identifizieren:

- Nach dem Auffüllen von Holz auf ein bestehendes Glutbett (oder kurze Zeit nach dem Anfeuern mit feinen Holzstücken) greift die Glut zuerst langsam auf das frische Holz über. Der Luftüberschuss ist in dieser Phase noch hoch. Weil vor allem noch ausgegaste Holzkohle verbrennt (ausser beim Anfeuern), ist der Feuchtigkeitsgehalt der Abgase gering. Sobald die Glut auf das frische Holz übergegriffen hat, steigt der Wassergehalt der Abgase um das Verbrennungswasser und die Feuchtigkeit des brennenden Holzes an.
- Die zunehmende Intensivierung der Verbrennung bewirkt, dass der Luftüberschuss absinkt. Bei genügend grossem Holzvorrat wird ein Gleichgewichtszustand erreicht, bei welchem die Entgasung durch die Primärluft begrenzt ist. Die Erwärmung des gesamten Holzvorrats führt zu dessen Trocknung, dadurch wird noch mehr Wasserdampf freigesetzt.
- Nach der vollständigen Trocknung des Holzvorrats sinkt der Wassergehalt der Abgase auf den Anteil des Verbrennungswassers ab. Die notwendige Wasserkühlung des Füllschachtes verhindert nun eine vorzeitige Pyrolyse des Holzvorrats. Stattdessen wird die von der Glut abgegebene Wärme an den Wasserkreislauf im Füllschacht übertragen.
- Beim Erschöpfen des Holzvorrats verändert sich die Abgaszusammensetzung nochmals: Weil aller Brennstoff bereits teilweise entgast ist, sinkt die Abgesfeuchtigkeit unter den Wert, der vom Verbrennungswasser von Holz zu erwarten wäre. Der Luftüberschuss steigt an, weil zur Entgasung der Holzkohle mehr Primärluft erforderlich ist.

Wie oben beschrieben verändert sich die Zusammensetzung des Brennstoffes im Verlauf eines Abbrandes. Ergebnisse aus der Verbrennungsrechnung können daher nur bedingt auf momentane Zustände während der Verbrennung bezogen werden. Die Verbrennungsrechnung stimmt nur bezogen auf Mittelwerte von Messungen über die Periode des Abbrennens einer ganzen Charge Holz.

Wenn in einer Stückholzfeuerung der während eines Abbrandes überstrichene Bereich des Luftüberschusses grösser ist als der Bereich, in welchem die Verbrennung annähernd vollständig ist, kann nur eine Anpassung der Luftzufuhr die Emissionen verringern.

### 9.1.3 Flammentemperatur einer Holzfeuerung

Als Flammentemperatur bezeichnen wir die Temperatur der ausgebrannten Verbrennungsgase, bevor diese den Wärmetauscher erreichen.

Die adiabate Verbrennungstemperatur wird in einer Feuerung wegen unvermeidlichen Wärmeverlusten nie erreicht. Der Ausbrandkanal einer Holzfeuerung kann problemlos genügend gut isoliert werden, nicht hingegen das Glutbett. Dort muss Platz für die anfallende Asche vorhanden sein. Bei Stückholzfeuerungen lässt sich der Übergang in den Füllschacht nicht isolieren. Bei Schnitzelfeuerungen bildet die Schnitzelzufuhr eine Wärmebrücke. Deshalb kann im allgemeinen davon ausgegangen werden, dass die reale Flammentemperatur in einer Holzfeuerung im wesentlichen durch den *Luftüberschuss* und die *Wärmeverluste der Glut* bestimmt werden. (Die zum Trocknen des Holzes aufgewendete Energie wird auch der Glut entzogen.)

In einer Schnitzelfeuerung ändert sich bei kontinuierlichem Betrieb nur die Glutgrösse in Abhängigkeit von der Leistung. Deshalb hängt dort der zeitliche Verlauf der Flammentemperatur vom Verlauf des Luftüberschusses und der Leistung sowie allenfalls von einer sich ändernden Holzfeuchtigkeit ab.

Aus den Messungen an einer Stückholzfeuerung folgt, dass der grösste Gradient des Temperaturprofils zwischen dem isolierten Glutbett und dem wassergekühlten Füllschacht beim Übergang der Glut in das aufliegende Holz liegt. Daraus folgt, dass die direkt auf der Glut liegenden, trockenen Holzstücke eine wirksame Wärmeisolation der Glut gegen oben bilden. Die Temperatur im Füllschacht liegt nur wenig über dessen Wassertemperatur. Auch die Gluttemperatur bleibt konstant. *Bei starren Randbedingungen beidseitig einer stabilen, isolierenden Schicht sind die Verluste der Glut zeitlich bis zum Ausbrand annähernd konstant.*

Der wassergekühlte Füllschacht nimmt dabei gerade den Anteil der von der Glut durch diese isolierenden Schicht dringenden Energie auf, der nicht vom eingefüllten, feuchten Holz absorbiert wird. Nach vollständiger Holz Trocknung steigt die Temperatur im Füllschacht geringfügig an, damit führt die Wasserkühlung mehr Leistung ab.

*Diese Vortrocknung bewirkt auch, dass die Flammentemperatur im Bereich, wo eine vollständige Verbrennung überhaupt möglich ist, von der Holzfeuchtigkeit unabhängig wird.* Bei zu hoher Holzfeuchtigkeit bildet sich nach dem Auffüllen kein gleichmässiges Glutbett aus.

Eine konstante Wärmeabgabe der Glut dürfte bei allen Stückholzfeuerungen mit unterem Abbrand solange gewährleistet sein, wie noch Holz auf der Glut liegt und

## 9 Schlussfolgerungen

sich die isolierende Schicht zwischen Glut und Holz bilden kann. Als Bedingungen an die Feuerungskonstruktion werden bei diesen Überlegungen gestellt: Wassergekühlter Füllschacht, seitlich und unten isoliertes Glutbett, isolierter Ausbrandkanal.

Wenn also die Wärmeverluste der Glut einigermassen konstant bleiben, ändert sich auch der Luftüberschuss bei konstanter Flammentemperatur nur wenig.

Deshalb ergibt die Regelung der Flammentemperatur auf einen festen Sollwert eine gute Verbrennung über den ganzen Abbrand. Es ist nicht notwendig, eine Gaskonzentration zur Regelung zu messen. Die Kohlenmonoxidemissionen sind in ähnlicher Weise von der Flammentemperatur wie vom Luftüberschuss abhängig.

Weil die Emissionen an unverbrannten Stoffen in einem gewissen *Bereich* der Flammentemperatur gering sind, ist die genaue Einhaltung des Flammentemperatursollwertes nicht kritisch.

Der Sollwert der Flammentemperaturregelung muss während des Abbrandes allenfalls an die Feuerungsleistung angepasst werden. Dies kommt daher, dass die konstanten Wärmeverluste der Glut im Verhältnis zur variablen Leistung stehen.

### 9.1.4 Beeinflussung des Luftüberschusses einer Stückholzfeuerung

Der Luftüberschuss lässt sich grundsätzlich durch die Primär- oder die Sekundärluftzufuhr beeinflussen. Er reagiert weit schneller auf Veränderungen der Sekundärluft als auf Veränderungen der Primärluft.

Wenn die Primärluft als Stellgrösse gewählt wird, können Störungen der Verbrennung ausgeregelt werden, welche durch unregelmässiges Nachrutschen von Holz aus dem Füllschacht verursacht worden sind. Die Entgasungsreaktionen verlaufen etwa proportional zur Primärluftmenge, sofern das Glutbett kompakt und genügend Brennstoff vorhanden ist. Bereits die Stabilisierung des Glutbettes durch eine Primärluftregelung hilft, die Emissionen zu verringern, denn nur wenn die Glut gleichmässig auf dem Rost vor dem Ausbrandkanal liegt, kann eine gute Durchmischung der Holzgase mit der Sekundärluft erreicht werden.

### 9.1.5 Reaktion der Verbrennung auf eine Veränderung der Primärluftzufuhr

Zur Simulation der Reaktion der Flammentemperatur bei veränderlicher Primärluftzufuhr haben wir ein einfaches theoretisches Modell der Glutdynamik erstellt. Die Modellierung der Auswirkungen von Primärluftveränderungen auf die Glut berücksichtigt zwei parallele Prozesse: Die schnelle, aber zeitlich begrenzte Reaktion der Entgasung an der Oberfläche der Glutstücke sowie die langsame Veränderung der gesamten Glutgrösse. Die Gasproduktion in der Glut bestimmt bei konstanter Sekundärluftzufuhr den Luftüberschuss und damit die Flammentemperatur.

Die schnellen Entgasungsreaktionen an der Glutoberfläche finden nur bei noch nicht völlig entgaster Glut statt, entsprechende Messungen während der Ausbrandphase haben gezeigt, dass diese Reaktion bei Holzkohle ausbleibt.

Das Glutwachstum setzt voraus, dass noch Brennstoff vorhanden ist, auf welchen die Glut übergreifen kann. Der Brennstoff darf bei diesem Prozess jedoch bereits entgast sein.

Somit treten diese beiden Phänomene bei allen Typen von Holzfeuerungen auf, wo die Primärluftzufuhr den Abbrand des Holzvorrats limitiert. Typischerweise ist dies bei Stückholzfeuerungen mit unterem Abbrand der Fall, weil dort viel Holz langsam verbrannt werden soll. Wenn in einer automatischen Feuerung die Holzzufuhr den Abbrand begrenzt, kann die Glut nicht wachsen. Bei überstöchiometrischer Primärluftzufuhr kann auch die Entgasung nicht mehr gesteigert werden.

Die Parameter dieser modellierten Prozesse können aufgrund von Messungen der Schrittantwort bestimmt werden. Dabei werden die Glutgrösse, die Grösse der Trennfläche zwischen der Glut und dem Holzvorrat und auch die Verteilung der zugeführten Primärluft die Zeitkonstanten und die Proportionalfaktoren bestimmen.

### 9.1.6 Auswirkungen der Flammentemperaturregelung

Die Regelung der Flammentemperatur mittels der Primärluftzufuhr verbessert die Verbrennungsqualität über den ganzen Abbrand deutlich, und zwar beim Verbrennen von Hart- und Weichholz unterschiedlicher Feuchtigkeit. Der Luftüberschuss wird gut stabilisiert, und auch das Nachrutschen des Holzes verläuft gleichmässiger. Die gemessenen Kohlenmonoxidemissionen konnten beträchtlich reduziert werden. Ein quantitativer Vergleich mit den Emissionen ohne Regelung ist nicht möglich, weil diese Emissionen von der willkürlichen Lufteinstellung bei einem Versuch abhängen und nicht reproduzierbar sind. Eine

## 9 Schlussfolgerungen

weitere Verbesserung der Regelgüte bringt keine Reduktion der CO-Emissionen, weil diese eine gewisse Toleranz bezüglich der Flammentemperatur aufweisen. Mit der Regelung wird gleichzeitig ein wesentliches Problem bestehender Holzfeuerungen gelöst: Die Verbrennungsqualität unregelmäßiger Feuerungen hängt stark von der fest eingestellten Luftzufuhr ab. Weil die optimale Einstellung im Betrieb oder bei der Reinigung verstellt werden kann, werden viele Feuerungen mit falscher Luftzufuhr betrieben. Daraus folgen allzu oft unnötig hohe Emissionswerte. Bei geregelterm Betrieb sind die Emissionen praktisch immer so niedrig, wie es die Feuerungskonstruktion erlaubt.

### 9.1.7 Anwendung der Flammentemperaturregelung bei Hack-schnitzelfeuerungen

Eine kontinuierliche Schnitzelfeuerung kann auch nach der Flammentemperatur geregelt werden. Feuerungstechnisch haben wir dort einfach einen sehr kleinen Füllschacht, welcher laufend nachgefüllt wird. Daraus folgt eine konstante Zusammensetzung des verbrennenden Holzes und eine konstante Wärmeverteilung. Es existiert bei einer Schnitzelfeuerung kein Abbrandzyklus mehr. Die optimale Flammentemperatur für eine gute Verbrennung bleibt somit konstant. Jedoch erlauben viele derartige Feuerungen einen bedeutend weiteren Bereich der Holzfeuchtigkeit, als er beim Stückholz auftritt. Auch wird die zur Trocknung aufgewendete Energie hier nicht mehr durch einen wassergekühlten Füllschacht gepuffert. Dadurch könnte die Flammentemperatur stärker von der Brennstofffeuchtigkeit abhängig sein.

Alle Messungen wurden am gleichen Typ der Versuchsfeuerung durchgeführt. Die Regelung kann jedoch auch an andere Feuerungen angepasst werden, wenn die Bedingungen aus dem folgenden Kapitel erfüllt werden.

## 9.2 Anforderungen an die Feuerungskonstruktion

Um eine beliebige Holzfeuerung mit einer Flammentemperaturregelung auszurüsten zu können, muss die Feuerung folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Luftzufuhr muss für die Primär- und Sekundärluft getrennt erfolgen. Das verwendete Stellorgan sollte eine lineare Charakteristik aufweisen.
- Die geregelte Luftzufuhr sollte in möglichst weiten Grenzen verstellbar sein. Eine zu enge Begrenzung der Stellauschläge der Regelung beeinträchtigt die Regelqualität.
- Die Feuerungskonstruktion muss dicht sein. Die Regelung allein soll die Luftzufuhr bestimmen, durch irgendwelche Ritzen angesaugte Falschlufft kann die Regelung unwirksam machen.
- Um einen stabilen Flammentempersollwert zu erreichen, müssen die Wärmeverluste der Glut konstant bleiben. Dies erhalten wir durch starre Randbedingungen beidseitig der isolierenden Schicht, welche die Glut vom Holzvorrat trennt. Konstruktiv erfordert dies bei einer Stückholzfeuerung z. B. die Wasserkühlung des Füllschachtes sowie eine Isolation der Glut.
- Bei automatischen Schnitzelfeuerungen muss nicht zwingend mit der Primärluft geregelt werden. Der Holznachschub steht dort als mögliche Stellgrösse direkt zur Verfügung. Brückenbildung und Holznachrutschen sind kein Problem. Deshalb wäre auch die Sekundärluft erneut in Betracht zu ziehen. Wenn die Sekundärluft als Stellgrösse verwendet wird, soll diese auf keinen Fall vorgewärmt werden! Die Luftvorwärmung reduziert die Reaktion der Flammentemperatur auf eine Änderung der Luftzufuhr beträchtlich.
- Die erreichbare Verbrennungsqualität hängt von der Konstruktion der Feuerung ab, eine schlecht konzipierte Feuerung wird auch mit Regelung schlecht bleiben.
- Die Parameter der Regelung (Proportional- und Integrationszeitkonstante) müssen für jede Feuerung neu bestimmt werden. Bei Stückholzfeuerungen werden dazu am besten aus Schrittantworten der Flammentemperatur die Parameter unseres Modells neu bestimmt und anschliessend die Regelparameter mittels Simulation des geschlossenen Regelkreises gewählt. Der Sollwert der Flammentemperatur sowie deren Koeffizient zur Anpassung an die Sekundärluftzufuhr kann aus der Messung von CO(Flammentemperatur)-Charakteristiken abgeleitet werden.

## 9 Schlussfolgerungen

- Wichtig für die Regelung ist auch die Platzierung des Thermoelements zur Messung der Flammentemperatur. Diese sollte im heissen Gasstrom nach dem vollständigen Ausbrand der Flamme gemessen werden. Weil bei hohen Temperaturen die Strahlung den grössten Energieaustausch bewirkt, ist darauf zu achten, dass die Wände rund um das Thermoelement gut isoliert sind. Das Element misst nämlich vorwiegend die Strahlungstemperatur der umgebenden Wände. Nur wenn diese gut isoliert sind, nimmt deren Oberfläche die Temperatur des Gasstromes an.
- In Stückholzfeuerungen hängt die Flammentemperatur stark von der Leistung ab, die der Füllschacht direkt aus der Glut aufnimmt. Diese Leistung ist den Verbrennungsgasen beim Ausbrand in der Flamme bereits entzogen. Weil eine hohe Verbrennungstemperatur den Ausbrand verbessert, sollte die Feuerung so konstruiert werden, dass der Füllschacht möglichst wenig Energie aufnimmt. Dies kann durch einen hohen, schmalen Füllschacht erreicht werden.
- Die Gluterhaltung funktioniert nur in Feuerungen, welche eine sehr gute Isolation des Glutbettes aufweisen. Sonst kühlt die Glut ab und erlischt. Ausserdem muss die Luftzufuhr dicht abschliessbar sein.

### 9.3 Offene Fragen

Auch wenn wir versucht haben, keine speziellen 'Laborbedingungen' zu schaffen, können wir nicht garantieren, dass die durch die Regelung erreichten Verbesserungen im Alltagsbetrieb gleichermassen zum tragen kommen. Deshalb ist es jetzt wichtig, geregelte Feuerungen unter Praxisbedingungen zu testen. Speziell die Verbindung der Verbrennungsregelung mit einem Heizungsregler muss noch ausgetestet werden. Danach können allenfalls noch Verbesserungen angebracht werden, bevor serienmässig gefertigte Feuerungen mit unserer Regelung ausgerüstet werden können.

Wie kann der Einbezug der Sekundärluft in den Regelalgorithmus in Extremsituationen die Emissionen verringern?

Die Lebensdauer der Thermoelemente zur Messung der Flammentemperatur hängt wesentlich von ihrem Schutzmantel ab. Ein dicker Mantel ergibt eine höhere Lebensdauer des Thermoelementes, aber eine langsame Reaktion auf die Flammentemperatur. Neben der Dicke ist auch noch das optimale Material für den Schutzmantel zu wählen.

Bei der Steuerung des Betriebsablaufs könnte der Startalgorithmus wahrscheinlich noch verbessert werden.

Weiterhin wäre es interessant, Versuche mit der Flammentemperaturregelung an einer Schnitzelfeuerung durchzuführen. Dazu müssten noch folgende Fragen geklärt werden:

---Wie wird die Schnitzelzufuhr geregelt oder gesteuert?

---Wird besser die Primär- oder die Sekundärluft geregelt?

---Die Feuchtigkeit von Holzschnitzeln erstreckt sich über einen weit grösseren Bereich als die von gelagertem Stückholz. Deshalb muss die Reaktion der Flammentemperatur auf die Holzfeuchtigkeit neu untersucht werden.

Es wäre interessant, die Emissionen im Stillstand der Feuerung bei geschlossener Luftzufuhr zu messen. Verursacht die Betriebsweise, bei welcher die Glut konserviert wird, wirklich weniger Emissionen als der vollständige Ausbrand der Restglut?

Erst wenn grössere Stückzahlen von Holzfeuerungen mit einer Regelung der Verbrennungsluft ausgerüstet sind, ist unser Ziel, Holzfeuerungen umweltverträglicher zu gestalten, erreicht.

# 10 Symbolverzeichnis

Lateinisches Alphabet		Einheit
A	Holzkonstante $A = 1 + \frac{m}{4} - \frac{n}{2}$	[-]
a	Holzkonstante $a = \frac{1}{A}$	[-]
$c_{pi}$	spezifische Wärme des Stoffes i (i = 4..7)	[kJ/kmol K]
$c_{pi,j}$	Polynomkoeffizient j des Stoffes i (j = 0..4)	[kJ/kmol K <sup>j+1</sup> ]
$d_i$	Zählerkoeffizienten der Feuerungsübertragungsfunktion (i = 0..4)	[-]
$e_i$	Nennerkoeffizienten der Feuerungsübertragungsfunktion (i = 0..4)	[-]
$f_i$	Nennerkoeffizienten der Störungsübertragungsfunktion (i = 0..5)	[-]
$G_F$	Übertragungsfunktion der Feuerung	[-]
$G_{Fz}$	z-Übertragungsfunktion der Feuerung	[-]
$G_P$	Übertragungsfunktion der Störung zur Primärluft	[-]
$G_R$	Übertragungsfunktion des Reglers	[-]
$G_{Rz}$	z-Übertragungsfunktion des Reglers	[-]
$G_S$	Übertragungsfunktion des Stellglieds	[-]
$G_{SFz}$	z-Übertragungsfunktion der Feuerung mit Stellglied	[-]
$G_{Stör}$	Störungsübertragungsfunktion	[-]
$G_{Stör,z}$	z-Störungsübertragungsfunktion	[-]
$G_z$	allgemeine z-Übertragungsfunktion	[-]
HT	Feuchttemperatur beim Psychrometer	[°C]
$h_u$	(unterer) Heizwert des Holzes	[kJ/kg]
$k_P$	Proportionalkonstante des Reglers	[-]
$k_i$	Proportionalkonstanten der Feuerung (i = 1..4)	[°C/(m <sup>3</sup> /h)]
$l_i$	Zählerkoeffizienten der Störungsübertragungsfunktion (i = 0..6)	[-]
M	Molmasse	[kg/kmol]
m	stöchiometrischer Anteil des Wasserstoffs im Holz	[-]
$\dot{m}_H$	Holzverbrauch	[kg/h]
$m_f$	Feuchtgewicht einer Holzprobe	[g]
$m_{tr}$	Trockengewicht einer Holzprobe	[g]
n	stöchiometrischer Anteil des Sauerstoffs im Holz	[-]
PS	Verhältnis der Primär- zur Sekundärluftvorwahl	[-]
p	Druck	[mbar]
$p_a$	Umgebungsluftdruck	[mbar]
$p_i$	i-ter Pol (i = 1..5)	[-]
$\dot{Q}$	Wärmestrom = Leistung	[kW]
$Q_A$	Abgasverluste	[kJ]

## 10 Symbolverzeichnis

$Q_{FS}$	Restwärme im Füllschacht	[kWh]
$\dot{Q}_{FS}$	Leistung des Füllschachtes	[kW]
$\dot{Q}_{HS}$	abgegebene Leistung an das Heizungssystem	[kW]
$Q_{SP}$	Restwärme im Speicher	[kWh]
$\dot{Q}_{WT}$	Leistung des Wärmetauschers	[kW]
$R$	Molare Gaskonstante	[kJ/kmol K]
$s$	Variable der Laplace-Transformation	[-]
$S$	Störung	[m <sup>3</sup> /h]
$SP$	Druck in der Messzelle des Psychrometers	[mbar]
$T$	Temperatur	[°C]
$TT$	Trockentemperatur beim Psychrometer	[°C]
$T_A$	Abgastemperatur	[°C]
$T_F$	Flammentemperatur	[°C]
$T_{F,soll}$	Soll-Flammentemperatur	[°C]
$T_K$	Flammentemperaturkorrekturfaktor	[°C/(m <sup>3</sup> /h)]
$T_O$	Flammentemperaturoffset	[°C]
$T_u$	Umgebungstemperatur	[°C]
$T_e$	Regelabweichung $T_{F,soll} - T_F$	[°C]
$T_p$	Temperatur der Reaktionsprodukte	[°C]
$U_P$	Stellsignal der Primärluftzufuhr (Frequenzwandler)	[V]
$u$	Holzfeuchtigkeit	[%]
$\dot{V}_{A,f}$	Volumenstrom der feuchten Abgase	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{A,tr}$	Volumenstrom der trockenen Abgase	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_L$	Gesamtluftzufuhr (trocken)	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_P$	Primärluftzufuhr (trocken)	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_S$	Sekundärluftzufuhr (trocken)	[m <sup>3</sup> /h]
$VP$	Dampfdruck	[mbar]
$V_{norm}$	Normvolumen von Gasen	[m <sup>3</sup> /kmol]
$w_i$	Nennerkoeffizienten der Übertragungsfunktion $G_P$ ( $i = 0..4$ )	[-]
$z$	Variable der z-Transformation	[-]
$z_i$	i-te Nullstelle ( $i = 1..3$ )	[-]

### Spezielle Symbole

% Das Prozentzeichen wurde im folgenden Sinne verwendet:

$$20 \% = 20 \frac{1}{100} = 0.2$$

<b>Griechisches Alphabet</b>		<b>Einheit</b>
$\Delta$	Differenz	[-]
$\Delta h$	Reaktionsenthalpie	[kJ/kmol]
$\eta$	Wirkungsgrad	[%]
$\lambda$	Luftüberschuss	[-]
$\lambda_{\text{CO}_2}$	aus dem CO <sub>2</sub> -Gehalt berechneter Luftüberschuss	[-]
$\lambda_{\text{G}}$	globaler Luftüberschuss	[-]
$\lambda_{\text{O}_2}$	aus dem O <sub>2</sub> -Gehalt berechneter Luftüberschuss	[-]
$\lambda_{\text{gemessen}}$	gemessener Luftüberschuss	[-]
$\nu_i$	i-ter stöchiometrischer Koeffizient (i = 1..7)	[-]
$\rho$	Schadstoffkonzentration der Abgase	[mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{A}}$	Dichte der Abgase	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{gemessen}}$	gemessene Schadstoffkonzentration der Abgase	[mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{normiert}}$	normierte Schadstoffkonzentration der Abgase	[mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_x$	Dichte der Abgaskomponente x	[kg/m <sup>3</sup> ]
$T_{\text{A}}$	Abtastzeit des Reglers	[s]
$T_{\text{I}}$	Integrationszeitkonstante des Reglers	[s]
$T_{\text{S}}$	Zeitkonstante des Stellglieds	[s]
$T_{\text{i}}$	Feuerungszeitkonstante (i = 1..4)	[s]

### Volumenanteile

{CO} {CO<sub>2</sub>} {H<sub>2</sub>O} {H<sub>2</sub>O<sub>Luft</sub>} {NO} {O<sub>2</sub>}

### Summenformeln der chemischen Stoffe

CH <sub>m</sub> O <sub>n</sub>	chemische Summenformel für Holz
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
H <sub>2</sub> O	Wasser
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff

### Operatoren

$Z$	Z-Transformation
$\mathcal{L}^{-1}$	inverse Laplacetransformation

## 11 Literaturverzeichnis

---

- [1] Marutzky R.: Verwertung, Vermeidung und Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen in der Forst- und Holzwirtschaft. WKI-Bericht Nr. 22, Wilhelm-Klauditz-Institut, Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig 1990
- [2] Wilkins E.; Murray F.: Toxicity of Emissions from Combustion and Pyrolysis of Wood. *Wood Science and Technology* 14: S. 281-288, Springer 1980
- [3] Marutzky R.; Schriever E.: Untersuchungen zur Emission von Kleinverbrennungsanlagen bei der Verbrennung von Holz, Torf und pflanzlichen Reststoffen. Abschlussbericht des BMFT-Vorhabens 01 VX 140, Fraunhofer Institut für Holzforschung, Braunschweig 1985
- [4] Nussbaumer T.: Emissionen von Holzfeuerungen. Schlussbericht des gleichnamigen Forschungsprojektes im Rahmen des NFP 12, Institut für Energietechnik, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich 1988
- [5] Cooper J. A.: Environmental Impact of Residential Wood Combustion Emissions and its Implications. *APCA Journal (Air Pollution Control Association)*, Vol. 30, No. 8, August 1980, S. 855-861
- [6] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1989, Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW). Bulletin SEV/VSE, Nr. 12/1990
- [7] Vesterinen R.: Emissions from Wood and Peat -Fired Heating Plants. *Suo* 37 (1): S. 11-18, Helsinki 1986. (Technical Research Center of Finland, Domestic Fuel Laboratory, P.O. Box 221, SF-40101 Jyväskylä, Finland)
- [8] Bossel U.; Gunold B.: Wärme aus Holz, Holzheizung in Theorie und Praxis. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1982
- [9] Nussbaumer T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Dissertation ETH Nr. 8838, Zürich 1989
- [10] Marutzky R.; Schriever E.: Emissionen bei der Verbrennung von Holzspanplattenresten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44, Springer 1986, S. 185-191

## 11 Literaturverzeichnis

- [11] Schriever E.: Zur Bestimmung von Chlor und Schwefel in Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 42, Springer 1984, S. 261-264
- [12] Solar Energy Research Institute (SERI): A survey of biomass gasification. Vol. I-III, Golden Colorado, SERI TR-33-239, US Dept. of Energy Contract No. EG-77-C-01-4042
- [13] Marutzky R.; Schriever E.: Holz – Emissionsarme Verbrennung in Kleinverbrennungsanlagen. IKZ-Haustechnik 40 (1985), Heft Nr. 19 und 23
- [14] Marutzky R.: Emissionsminderung bei holzbetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen. VDI-Berichte Nr. 623, 1986
- [15] Nussbaumer T.; Kerschbaumer D.: Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten. HeizungKlima Nr.11 1987, S. 100-105
- [16] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Verein Deutscher Ingenieure, 4. Auflage, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1984
- [17] Ohlemiller T. J.; Kashiwagi T.; Werner K.: Products of Wood Gasification. NBSIR 85-3127, U.S. Department of Commerce 1985
- [18] Ohlemiller T. J.; Shaub W.: Products of Wood Smolder and their Relation to Wood-Burning Stoves. NBSIR 88-3767, U.S. Department of Commerce 1988
- [19] Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung. Bundesamt für Umweltschutz, Bern 1985
- [20] Kerschbaumer D.; Nussbaumer T.: Ergänzungen zum Artikel "Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten". HeizungKlima Nr.11 1989, S. 107-109
- [21] Böhlm; Ultrakust Electronic GmbH: Sudetenstr. 5-7, D-8375 Ruhmannsfelden, Gebrauchsanleitung zum Feuchtigkeitsmessgerät Hygrophil-h Typ 4220 Serie A Stand 9/89
- [22] Bohl W.: Technische Strömungslehre. 3. Auflage, Vogel Wiesbaden 1978 (Kamprath-Reihe : Kompaktlehrbuch : Technik)

- [23] Kober A.; Plinke B.: Feuchtemessung an Holz, Holzwerkstoffen und Baustoffen. WKI-Bericht Nr. 21, Wilhelm-Klaudiz-Institut, Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig 1989
- [24] Oren M. J.; Karunakaran K. P.; Pegg M. J.; MacKay G. D. M.: Mechanism of Wood Combustion. 1. Flue gas analysis. Fuel, Vol 66, January 1987, S. 9-12
- [25] Zayed R. S.; Oren M. J.; MacKay G. D. M.: Mechanism of Wood Combustion. 2. Weight loss analysis. Fuel, Vol 66, August 1987, S. 1166-1167
- [26] Rietz G.: Zur Brandgefährlichkeit von Holz. Holztechnologie.–Leipzig 30 (1989) 5, S. 236-239
- [27] Unbehauen H.: Regelungstechnik. Band 1, 5. Auflage und Band 2, 4. Auflage, Vieweg Braunschweig / Wiesbaden 1987

## **Lebensleuf**

23. 6. 1959 Geboren in Olten
- 1966 – 1972 Primarschule in Olten
- 1972 – 1974 Bezirksschule in Olten
- 1974 – 1978 Kantonsschule in Olten. Abschluss mit Matura Typus C.
- 1978 – 1984 Studium der Physik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Dazwischen 4 Monate Arbeit bei der Firma NCR im Computerservice.
- 1984 Diplomarbeit über 'Galliumarsenid Schottky-Dioden' bei Prof. H. Melchior.
- 1984 – 1990 Assistent bei Professor Shah am 'Institut de Microtechnique' in Neuenburg. Durchführung des Projektes und Nachfolgeprojektes 'Regelung einer Stückholzfeuerung' der Kommission für wissenschaftliche Forschung in Zusammenarbeit mit der Firma Tiba AG in Bubendorf / BL.